

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

(В ТРЕХ ТОМАХ)

ШЕСТОЕ ИЗДАНИЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ

профессоров Московского энергетического института
В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова, В. А. Лабунцова,
И. Н. Орлова (главный редактор), М. М. Соколова, А. М. Федосеева,
А. Я. Шихина и инж. И. В. Антика

ТОМ 1

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ



МОСКВА • «ЭНЕРГИЯ» • 1980

Электротехнический справочник. В 3-х т. Т. 1.
Э45 Общие вопросы. Электротехнические материалы/
Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова,
П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. — 6-е изд.,
испр. и доп. — М.: Энергия, 1980. — 520 с., ил.

Помещены сведения по теоретическим основам электротехники, электрофизике проводников, полупроводников и диэлектриков, общим вопросам электрооборудования, технике безопасности, электротехническим материалам, измерениям электрических и магнитных величин, кабельным изделиям. Приводятся указания по оформлению чертежей и схем. Предыдущее пятое издание справочника выпущено в 1974 г.
Рассчитан на широкий круг инженеров-электриков.

Э 30306-360
051(01)-80 121-80. 2302000000

ББК 31.2
6П2.1

ПРЕДИСЛОВИЕ К ШЕСТОМУ ИЗДАНИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО СПРАВОЧНИКА

Поставленные XXV съездом КПСС очередные задачи страны по повышению эффективности общественного производства определяют опережающие темпы и качественно новый уровень развития электроэнергетики и электрификации. В соответствии с решениями съезда существенно увеличены мощность электростанций СССР и производство электроэнергии, которое к концу 1980 г. должно составить 1380 млрд. кВт·ч. Дальнейшее развитие электроэнергетики и электрификации страны, предусматриваемое в XI пятилетке, будет происходить в полном соответствии с ленинскими идеями, заложенными в исторический план ГОЭЛРО, 60-летие которого отмечается в последние дни текущего пятилетия.

Продолжится концентрация энергетических мощностей на станциях, где вводятся энергоблоки 500, 800 и 1200 тыс. кВт. Рост энергетического потенциала страны намечается преимущественно за счет использования гидроэнергии, дешевых углей и атомной энергии, причем ускоренное строительство атомных станций большой мощности явится одним из важнейших направлений в решении топливно-энергетической проблемы.

Предстоит дальнейшее развитие Единой энергетической системы СССР, уже охватившей после присоединения энергосистемы Сибири территорию с населением более 220 млн. человек и достигшей мощности почти 200 млн. кВт. Для этого усиливаются существующие мощные межсистемные связи, сооружаются новые с переменным напряжением 750 и 1150 кВ, а также электропередача постоянного тока напряжением 1150 кВ.

Быстрыми темпами развивается и совершенствуется электрификация промышленности, возрастает мощность электропотребителей на предприятиях, качественно изменяются их технические и технико-экономические характеристики. Возрастают также энергетические мощности и энергооборуженность труда на предприятиях сельского хозяйства. Широкое развитие получают сети сельской электрификации, протяженность которых превысила уже 3 млн. км. Совершенствуются системы электроснабжения городских потребителей, в том числе для бытовых нужд, значительное дальнейшее развитие получает электрификация транспорта.

Прогресс в электроэнергетике и электрификации связан как с ростом единичных мощностей, внедрением новых типов и улучшением характеристик энергетического оборудования, служащего для производства, передачи, распределения и использования электроэнергии, так и с разработкой и практическим применением новых систем управления, автоматического регулирования и защиты. Широкое использование средств современной электронной вычислительной техники в таких системах, а также при проектировании и эксплуатации их открыло новые возможности для повышения уровня технических решений и для роста эффективности самого инженерного труда. В свою очередь широкое применение средств вычислительной техники стимулирует разработку новых методов расчета, анализа и проектирования в электротехнике и электроэнергетике.

Осуществление грандиозной программы развития электроэнергетики требует подготовки все более квалифицированных специалистов различного профиля. Одним из важных условий успешной подготовки специалистов, овладевших теорией и умеющих грамотно использовать ее на практике, является наличие высококачественных учебников и пособий, в том числе справочного характера. Опыт учебной работы вузов показал, что необходимы справочники, подготовленные специально для целей курсового и дипломного проектирования.

В 1952 г. профессорско-преподавательским коллективом Московского энергетического института был составлен «Электротехнический справочник», ныне выходящий в переработанном и дополненном виде в шестом издании. Задуманный как учебное пособие для студентов, он, как показал опыт его использования, нашел успешное применение и в инженерной практике на производстве. Материал настоящего издания справочника поэтому подбирался и обрабатывался так, чтобы возможно полнее и лучше удовлетворять обеим этим целям.

Справочник предназначен для студентов и инженеров, проектирующих электротехнические устройства, установки и оборудование. Студенты найдут в нем сведения и данные, необходимые, главным образом, при курсовом проектировании. Студентам-дипломникам по вопросам их узкой специальности необходимо дополнительно использовать специализированные справочники, каталоги и ГОСТ. В справочник вошли материалы, нужные, как правило, широкому кругу проектировщиков-электриков. Соответственно обработаны и материалы каталожного характера. Цены на электрооборудование, изделия и материалы даны в упрощенном, в ряде случаев — обобщенном виде, для получения проектной справочной справки.

Справочник выходит в трех томах. Составители старались возможно четче распределить материал справочника по отдельным темам, однако деление это носит несколько условный характер. В первом томе «Общие вопросы. Электротехнические материалы» даются основные сведения по электротехнике, электрофизике, измерениям и по электротехническим материалам, а также сведения по безопасности электроустановок и определению эффективности новой промышленной продукции. Во втором томе «Электротехнические устройства» приводятся данные по резисторам, конденсаторам, реакторам, трансформаторам, электрическим машинам, электрическим аппаратам, вентильным преобразователям и химическим источникам тока. В первой книге третьего тома «Производство, передача и распределение электроэнергии» сосредоточены материалы по энергетическим системам, распределительным устройствам, электрическим сетям, по автоматизации, релейной защите, управлению и контролю их работы, а также по технико-экономическим показателям в энергосистемах. Вторая книга четвертого тома «Использование электрической энергии» содержит сведения и материалы по автоматизированному электроприводу, электроснабжению промышленных предприятий, электротермии, электрическому транспорту, электрическому освещению и другим системам электрооборудования промышленности, транспорта и быта.

По сравнению с пятым изданием в шестое внесены изменения не только в расположение, но и в содержание материала с учетом развития электротехники и электроэнергетики как науки и области техники. Внесены также уточнения в связи с утверждением новых ГОСТ, ПУЭ и СНиП. В необходимых случаях приводимым материалам придава форма, облегчающая использование современной вычислительной техники.

Над подготовкой настоящего издания работали в основном те же авторы, что и при пятом издании, но частично были привлечены и новые авторы. Как и ранее, справочник подготовлен профессорами и преподавателями МЭИ и лишь для немногих разделов привлекались ведущие работники промышленности. Составленный авторами материал проверен заведующими соответствующими кафедрами МЭИ. Перечень лиц, участвовавших в работе над справочником, приводится в начале каждого тома.

Со времени выхода в свет предыдущего издания ушли из жизни главный редактор справочника проф. Михаил Григорьевич Чиликин и член редакционной коллегии чл.-кор. АН СССР Георгий Николаевич Петров, внесшие неоценимый вклад в создание «Электротехнического справочника». Работу над настоящим изданием справочника осуществляла редакционная коллегия в обновленном составе.

Редакционная коллегия справочника приносит благодарность организациям, кафедрам других институтов и отдельным лицам, приславшим свои замечания и предложения по пятому изданию справочника и тем способствовавшим улучшению данного издания. Особенно большую помощь в работе авторам и редакторам настоящего справочника оказали лица, выполнившие по просьбе Издательства рецензирование материалов предыдущего издания.

Составители справочника просят лиц, пользующихся новым изданием, сообщить о всех замеченных недостатках и предложениях по улучшению содержания справочника по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, редакционной коллегии «Электротехнического справочника».

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к шестому изданию электротехнического справочника	3	Раздел 7. Определение эффективности новой техники	248
Раздел 1. Единицы физических величин. Важнейшие физические постоянные	7	Раздел 8. Безопасность электроустановок и электрооборудования	263
Раздел 2. Основные правила оформления конструкторской документации	23	Раздел 9. Электроизоляционные материалы	287
Раздел 3. Основные сведения по электрофизике	69	Раздел 10. Полупроводниковые материалы	316
Раздел 4. Теоретические основы электротехники	106	Раздел 11. Магнитные материалы	325
Раздел 5. Измерение электрических и магнитных величин	175	Раздел 12. Проводниковые материалы, неизолированные провода и шины	351
Раздел 6. Общие вопросы электро-технического оборудования	222	Раздел 13. Электроизоляционные конструкции и изоляторы	397
		Раздел 14. Кабельные изделия	422
		Раздел 15. Полупроводниковые приборы и микросхемы	481
		Предметный указатель	512

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Материал первого тома подготовили:
 Разд. 1 — канд. техн. наук, доц. Б. Я. Жу-
 ховицкий.
 Разд. 2 — доктор техн. наук, проф.
 Г. И. Ягодкин, канд. техн. наук,
 доц. Е. Г. Кузьмина.
 Разд. 3 — канд. техн. наук, проф. Е. С. Ку-
 харкин (§ 3-1, 3-3, 3-4, 3-8, 3-9),
 канд. техн. наук, доц. Н. В. Ни-
 кулин (§ 3-2), канд. техн. наук,
 доц. В. Д. Соболев и ст. преп.
 М. Н. Урлапова (§ 3-5—3-7).
 Разд. 4 — канд. техн. наук, доц. Б. Я. Жу-
 ховицкий, доктор техн. наук,
 проф. П. А. Ионкин.
 Разд. 5 — доктор техн. наук, проф.
 В. Н. Малиновский (§ 5-1—5-15),
 канд. техн. наук, доц. В. Г. Сер-
 геев (§ 5-16, 5-17).
 Разд. 6 — канд. техн. наук, доц. Г. С. Плис.
 Разд. 7 — канд. техн. наук, доц. В. В. Фу-
 раева.
 Разд. 8 — доктор техн. наук, проф.
 Б. А. Князевский, Н. А. Чекалин.

Разд. 9 — канд. техн. наук, доц. Н. В. Ни-
 кулин.
 Разд. 10 — канд. техн. наук, доц. А. Н. Под-
 марьков.
 Разд. 11 — канд. техн. наук, доц. В. Г. Сер-
 геев.
 Разд. 12 — канд. техн. наук, доц. А. П. Геп-
 не (§ 12-1—12-10), доктор
 техн. наук, ст. науч. сотр.
 И. Б. Пешков (§ 12-11—12-17).
 Разд. 13 — канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Еси-
 ков (§ 13-4—13-6), канд. техн.
 наук, доц. Ю. С. Пинталь
 (§ 13-1—13-3).
 Разд. 14 — канд. техн. наук, доц. Э. Т. Ла-
 рина (§ 14-6, 14-10—14-13),
 канд. техн. наук, доц. И. Б. Ря-
 занов (§ 14-7, 14-8), канд. техн.
 наук, доц. С. Д. Холодный
 (§ 14-1—14-5, 14-9, 14-14).
 Разд. 15 — канд. техн. наук, доц. С. Г. Обу-
 хов (§ 15-6, 15-7), канд. техн.
 наук, доц. А. Н. Старостин
 (§ 15-1—15-5).

Материал соответствующих разделов тома просмотрен заведующими кафедрами
 МЭИ: доктором техн. наук, проф. В. Г. Герасимовым, доктором техн. наук, проф.
 П. А. Ионкиным, доктором техн. наук, проф. Б. А. Князевским, доктором техн. наук,
 проф. В. С. Крикоровым, доктором техн. наук, проф. В. А. Лабунцовым, доктором
 техн. наук, проф. В. П. Ларионовым, доктором техн. наук, проф. В. Н. Малиновским,
 канд. техн. наук, доц. А. М. Некрасовым, доктором техн. наук, проф. Г. И. Ягодкиным.
 Редактирование материалов тома осуществлено проф. В. Г. Герасимовым и проф.
 А. Я. Шихиным.

СОДЕРЖАНИЕ ВТОРОГО ТОМА

Электротехнические устройства

- Раздел 16.* Резисторы, конденсаторы, реакторы
Раздел 17. Трансформаторы и автотрансформаторы
Раздел 18. Общие вопросы электрических машин
Раздел 19. Электрические машины переменного тока
Раздел 20. Электрические машины постоянного тока
Раздел 21. Электрические машины автоматических устройств

- Раздел 22.* Коммутационная и защитная аппаратура высокого напряжения
Раздел 23. Трансформаторы тока и напряжения
Раздел 24. Аппараты низкого напряжения
Раздел 25. Комплектные устройства высокого напряжения
Раздел 26. Вентильные преобразователи электрической энергии
Раздел 27. Химические источники тока и их применение

СОДЕРЖАНИЕ ТРЕТЬЕГО ТОМА

Книга 1

Производство, передача и распределение электрической энергии

- Раздел 28.* Общие вопросы энергетических систем
Раздел 29. Схемы электрических соединений электростанций и подстанций
Раздел 30. Конструкции распределительных устройств
Раздел 31. Электрические сети высокого напряжения
Раздел 32. Электропередачи переменного и постоянного тока высокого напряжения
Раздел 33. Конструкция воздушных и кабельных линий
Раздел 34. Электроснабжение городов и сельских местностей
Раздел 35. Переходные процессы в электроэнергетических системах
Раздел 36. Токи короткого замыкания и выбор аппаратов
Раздел 37. Перенапряжения и защита от перенапряжений
Раздел 38. Автоматизация в энергосистемах
Раздел 39. Релейная защита

- Раздел 40.* Управление, контроль и сигнализация на электростанциях и подстанциях
Раздел 41. Техника-экономические показатели в энергосистемах

Книга 2

Использование электрической энергии

- Раздел 42.* Электропривод
Раздел 43. Автоматическое управление электроприводами
Раздел 44. Электропривод общепромышленных механизмов
Раздел 45. Электротермическое оборудование
Раздел 46. Оборудование для электротехнологий
Раздел 47. Оборудование для электросварки
Раздел 48. Электрическое освещение
Раздел 49. Электрооборудование взрывоопасных производств
Раздел 50. Электроснабжение промышленных предприятий
Раздел 51. Электрический транспорт
Раздел 52. Электрооборудование автомобилей
Раздел 53. Электробытовые приборы
Раздел 54. Электрические ручные и переносные машины (электроинструмент)
Раздел 55. Индустриальные радиопомехи
Раздел 56. Промышленные шумы

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. ВАЖНЕЙШИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

СОДЕРЖАНИЕ

1-1. Международная система единиц (СИ, SI) Основные единицы СИ (7). Дополнительные единицы СИ (8)	7
1-2. Единицы механических величин Системы единиц в механике (8). Единицы механических величин в Международной системе единиц СИ (8). Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ (9). Внесистемные единицы, допускаемые к применению в специальных областях (10). Пересчет единиц энергии (10). Пересчет единиц мощности (10). Пересчет единиц момента инерции и махового момента (10). Метрические и неметрические единицы длины, площади, объема, массы, работы и энергии, мощности, давления, скорости, частоты вращения (11). Децибел и непер (12)	8
1-3. Единицы акустических величин	13
1-4. Единицы тепловых и световых величин, величин, характеризующих ионизирующие излучения и радиоактивность	14

Единицы тепловых величин в Международной системе СИ (14). Сравнение температурных шкал (15). Единицы световых величин в Международной системе СИ (15). Единицы величин, характеризующих ионизирующие излучения и радиоактивность, в Международной системе СИ (15)	
1-5. Единицы электрических и магнитных величин Единицы Международной системы СИ (16). Единицы электрических и магнитных величин, допускаемые наравне с единицами СИ до 01.01. 1980 г. (18)	16
1-6. Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц и их наименования	18
1-7. Важнейшие физические постоянные (фундаментальные константы)	18
1-8. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева	20
1-9. Буквенные обозначения основных электрических и магнитных величин	22
Список литературы	23

1-1. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ, SI)

Основные единицы СИ

1. Метр (м, m)—единица длины. Метр равен 1 650 763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

2. Килограмм (кг, kg)—единица массы. Килограмм равен массе международно-го прототипа килограмма.

3. Секунда (с, s)—единица времени. Секунда равна 1 92 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния цезия-138.

4. Ампер (А)—единица силы электрического тока. Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

5. Кельвин (К)—единица термодинамической температуры. Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

6. Моль (моль, mol)—единица количества вещества. Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

7. Кандела (кд, cd)—единица силы света. Кандела равна силе света, испускаемого с поверхности площадью $1/600\,000$ м² полного излучателя в перпендикулярном направлении, при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па.

Кроме температуры Кельвина (обозначение Т) допускается применять также температуру Цельсия (обозначение t), определяемую выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К по определению. По размеру градус Цельсия равен кельвину. Интервал или разность температур Кельвина выражают в кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия.

Примечания: 1. Электрические и магнитные единицы СИ образованы в соответствии с рационализованной формой уравнений электромагнитного поля.

2. В системе СИ для измерения температуры принята термодинамическая температурная шкала.

3. С Международной системой единиц СИ совпадают четыре частные системы, применявшиеся до ее введения в отдельных областях науки и техники:

МКС (м, кг, с) — например, в механике и акустике;

МКСГ (м, кг, с, К) — например, в молекулярной физике, термодинамике и теплотехнике; МКСА (м, кг, с, А) — например, в электротехнике, при электрических измерениях;

МСС (м, с, кд) — например, в фотометрии, светотехнике.

Дополнительные единицы СИ

1. Радиан (рад, rad) — единица плоского угла. Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

2. Стерadian (ср, sr) — единица телесного угла. Стерadian равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

1-2. ЕДИНИЦЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Системы единиц в механике

В основу построения систем единиц в механике положены три основных независимые единицы. Первые две — единицы длины и времени. Системы, в которых в качестве третьей основной единицы взята единица массы, называют динамическими и часто еще абсолютными. Системы с третьей основной единицей — единицей силы — называют статическими.

Единицы механических величин в Международной системе единиц СИ

Выражение через единицы СИ может служить для проверки получаемых уравнений и для перехода к другим единицам. При этом необязательно выражать рассматриваемые единицы через основные. Поэтому в таблице кроме выражений через основные единицы указаны и практически наиболее удобные формы.

Обозначение системы	Основные и производные единицы					
	длины	массы	времени	силы	работы	мощности
СИ; SI (или МКС, MKS)	1 м (метр)	1 кг (килограмм)	1 с (секунда)	1 кг·м/с ² =1 Н (ньютон)	1 Н·м=1 Дж (джоуль)	1 Дж/с=1 Вт (ватт)
СГС; CGS (гауссова)	1 см (сантиметр)	1 г (грамм)	1 с (секунда)	1 г·см/с ² = =1 дин (дина)	1 дин·см= =1 эрг (эрг)	1 эрг/с
МКГСС; МКГС (техническая)	1 м (метр)	1 кгс·с ² /м= =1 т.е.м. (технич. ед. массы)	1 с (секунда)	1 кгс (килограмм-сила)	1 кгс·м	1 кгс·м/с

1 м=100 см; 1 кг=1000 г; 1 т.е.м.=9,81 кг.

Примечания: 1. Единицы технической системы МКГСС и системы СГС допускались к применению до 1 января 1980 г.

2. Жирным шрифтом выделены три основные единицы каждой из систем.

Единицы механических величин в Международной системе СИ

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единицы системы	
			русское	международное	СГС (гауссовой)	МКГСС (технической)
Длина	метр	м	м	m	100 (см)	1 (м)
Масса	килограмм	кг	кг	kg	1000 (г)	0,102 (т.е.м., кгс·с ² /м)
Время	секунда	с	с	s	1 (с)	1 (с)
Площадь	кв. метр	м ²	м ²	m ²	10 ⁴ (см ²)	1 (м ²)
Объем, вместимость	куб. метр	м ³	м ³	m ³	10 ⁶ (см ³)	1 (м ³)
Сила, вес*	ньютон	кг·м/с ²	Н	N	10 ⁵ (дин)	0,102 (кгс)
Плотность	килограмм куб. метр	кг/м ³	кг/м ³	kg/m ³	10 ⁻³ (г/см ³)	0,102 (кгс·с ² /м ⁴)

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единицы системы	
			русское	международное	СГС (гауссовой)	МКГСС (технической)
Момент силы	ньютон-метр	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$	Н·м	N·m	10^7 (дин·см)	0,102 (кгс·м)
Работа, энергия	джоуль	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$	Дж	J	10^7 (эрг)	0,102 (кгс·м)
Мощность	ватт	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3 = \text{Дж}/\text{с}$	Вт	W	10^7 (эрг/с)	0,102 (кгс·м/с)
Давление, механическое напряжение	паскаль	$\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2) = \text{Н}/\text{м}^2$	Па	Pa	10 (дин/см ²)	0,102 (кгс/м ²)
Количество движения (импульс)	килограмм-метр в секунду	$\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$	кг·м/с	kg·m/s	10^9 (дин·с)	0,102 (кгс·с)
Момент количества движения (момент импульса)	килограмм-метр в квадрате в секунду	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с} = \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$	кг·м ² /с	kg·m ² /s	10^9 (эрг·с)	0,102 (кгс·м·с)
Момент инерции (динамический)	килограмм-метр в квадрате	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	кг·м ²	kg·m ²	10^7 (г·см ²)	0,102 (кгс·м·с ²)
Скорость	метр в секунду	м/с	м/с	m/s	100 (см/с)	1 (м/с)
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²	м/с ²	m/s ²	100 (см/с ²)	1 (м/с ²)
Угловая скорость	радиан в секунду	с ⁻¹	рад/с	rad/s	1 (с ⁻¹)	1 (с ⁻¹)
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	с ⁻²	рад/с ²	rad/s ²	1 (с ⁻²)	1 (с ⁻²)
Период	секунда	с	с	s	1 (с)	1 (с)
Частота периодического процесса**	герц	с ⁻¹	Гц	Hz	1 (с ⁻¹)	1 (с ⁻¹)
Частота дискретных событий (импульсов, ударов и т. п.)	секунда в минус первой степени	с ⁻¹	с ⁻¹	s ⁻¹	1 (с ⁻¹)	1 (с ⁻¹)
Частота вращения	оборот в секунду	с ⁻¹	с ⁻¹	s ⁻¹	1 (об/с)	60 (об/мин)
Волновое число	метр в минус первой степени	м ⁻¹	м ⁻¹	m ⁻¹	0,01 (см ⁻¹)	1 (м ⁻¹)
Динамическая вязкость	паскаль-секунда	кг/(м·с)	Па·с	Pa·s	10 (дин·с/см ²)	0,102 (кгс·с/м ²)
Кинематическая вязкость	кв. метр в секунду	м ² /с	м ² /с	m ² /s	10^4 (см ² /с)	1 (м ² /с)

* Для определения веса тела в ньютонах необходимо его массу, заданную в килограммах, умножить на 9,81.

** Октава (окт) — интервал частот, в котором отношение крайних частот равно двум, декада (дек) — интервал частот, в котором отношение крайних частот равно десяти.

Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		русское	международное	
Масса	тонна	т	t	10^3 кг
Время	минута	мин	min	60 с
	час	ч	h	3600 с
	сутки	сут	d	86 400 с
Плоский угол	градус	°	°	$(\pi/180)$ рад= $1,745\,329 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	′	′	$(\pi/10\,800)$ рад= $2,908\,882 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	″	″	$(\pi/648\,000)$ рад= $4,848\,137 \cdot 10^{-6}$ рад
Объем, вместимость	литр	л	l	10^{-3} м³

Примечания: 1. Допускается также применять другие единицы времени, получившие широкое распространение, например: неделя, месяц, год, век, тысячелетие и т. п.

2. Единицу литр не рекомендуется применять при точных измерениях.

3. Приведенные выше единицы времени и плоского угла не допускается применять с приставками.

Внесистемные единицы, допускаемые к применению в специальных областях

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		русское	международное	
Длина (в астрономии)	астрономическая единица	а. е.	Ua	1,49598·10 ¹¹ м (приблизительно)
	световой год	св. год	ly	9,4605·10 ¹⁵ м (приблизительно)
	парсек	пк	pc	3,0857·10 ¹⁶ м (приблизительно)
Площадь (в сельском и лесном хозяйстве)	гектар	га	ha	1·10 ⁴ м ²
Масса (в атомной физике)	атомная единица массы	а. е. м.	u	1,66057·10 ⁻²⁷ кг (приблизительно)
Энергия (в физике)	электрон-вольт	эВ	eV	1,60219·10 ⁻¹⁹ Дж (приблизительно)

Пересчет единиц энергии

	Дж	кВт·ч	кгс·м	ккал	эВ	эрг
1 Дж	1	$2,78 \cdot 10^{-7}$	0,102	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$6,24 \cdot 10^{18}$	10^7
1 кВт·ч	$3,60 \cdot 10^6$	1	$3,67 \cdot 10^5$	860,0	$2,25 \cdot 10^{25}$	$3,60 \cdot 10^{18}$
1 кгс·м	9,81	$2,72 \cdot 10^{-5}$	1	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$6,12 \cdot 10^{19}$	$9,81 \cdot 10^7$
1 ккал	$4,19 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	427	1	$2,61 \cdot 10^{22}$	$4,19 \cdot 10^{10}$
1 эВ	$1,60 \cdot 10^{-19}$	$4,45 \cdot 10^{-24}$	$1,63 \cdot 10^{-20}$	$3,83 \cdot 10^{-23}$	1	$1,60 \cdot 10^{-12}$
1 эрг	10^{-7}	$2,78 \cdot 10^{-14}$	$0,102 \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-11}$	$6,24 \cdot 10^{11}$	1

Пример. 1 Дж = $2,78 \cdot 10^{-7}$ кВт·ч = 0,102 кгс·м = ...

Пересчет единиц мощности

	Вт	кВт	кгс·м/с	л. с.	ккал/с	эрг/с
1 Вт	1	10^{-3}	0,102	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	10^7
1 кгс·м/с	9,81	$9,81 \cdot 10^{-3}$	1	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$9,81 \cdot 10^7$
1 л. с.	736	0,736	75	1	0,176	$7,36 \cdot 10^8$
1 ккал/с	$4,19 \cdot 10^3$	4,19	427	5,69	1	$4,19 \cdot 10^{10}$
1 эрг/с	10^{-7}	10^{-10}	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$1,36 \cdot 10^{-10}$	$2,39 \cdot 10^{-11}$	1

Пересчет единиц момента инерции и махового момента

	Момент инерции				Момент маховой	
	кг·м ²	г·см ²	кгс·м·с ²	гс·см·с ²	кгс·м ²	гс·м ²
Момент инерции (динамический) J	1 кг·м ²	1	10^7	0,102	$0,102 \cdot 10^5$	4
	1 г·см ²	10^{-7}	1	$0,102 \cdot 10^{-7}$	$0,102 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-7}$
	1 кгс·м·с ²	9,81	$9,81 \cdot 10^7$	1	10^5	$4 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}$
	1 гс·см·с ²	$9,81 \cdot 10^{-5}$	$9,81 \cdot 10^2$	10^{-5}	1	$4 \cdot 9,81 \cdot 10^{-5}$
Момент маховой GD ²	1 кгс·м ²	1/4	$10^7/4$	$0,102/4$	$0,102 \cdot 10^5/4$	1
	1 гс·м ²	$10^8/4$	$10^{10}/4$	$0,102 \cdot 10^2/4$	$0,102 \cdot 10^8/4$	10^{-3}

$$GD^2=4gJ; g=9,81 \text{ м/с}^2.$$

Метрические

и неметрические единицы длины, площади, объема, массы, работы и энергии, мощности, давления, скорости, частоты вращения

Ниже приводятся единицы измерения, встречающиеся в отечественной и зарубежной литературе. Для единиц, применявшихся в СССР, использованы обозначения: *устар.* — устаревшая; *до 01.01. 1980 г.*; *до срока, который будет установлен.*

Измерение длины в других единицах

1 мк (микро — *устар.*) = 1 микрометр (мкм) = 10^{-6} м = 10^{-4} см
1 нм (нанометр — *устар.*) = 1 нанометр = 10^{-9} м = 10^{-6} мм

1 Å (ангстрем — *до 01.01. 1980 г.*) = 10^{-10} м = 10^{-8} см (точно)

1 икс-ед. (икс-единица — *до 01.01. 1980 г.*) = $1,00206 \cdot 10^{-13}$ м = $1,00206 \cdot 10^{-11}$ см

1 ферми (*устар.*) = 10^{-15} м = 10^{-13} см

1 м. миля (морская миля, в морской навигации — *до срока, который будет установлен*) = 1852 м (точно)

Измерение длины в старых русских мерах

1 линия = 2,54 мм
1 дюйм = 10 линиям = 2,54 см
1 вершок = 4,44 см
1 фут = 12 дюймам = 30,48 см
1 аршин = 16 вершкам = 28 дюймам = 71,1 см
1 сажень = 3 аршинам = 7 футам = 2,13 м
1 верста = 500 саженям = 1,067 км
1 миля = 7 верстам = 7,467 км

Измерение длины в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 мил (Mil) = 10^{-3} дюйма = 0,0254 мм
1 линия (Line) малая = 2,12 мм
1 линия большая = 100 мил = 2,54 мм
1 дюйм (Inch) = 12 мал. линий = 10 больш. линий = 2,54 см
1 хэнд (Hand) = 4 дюймам = 10,16 см
1 фут (Foot) = 3 хэндам = 12 дюймам = 30,48 см
1 ярд (Yard) = 3 футам = 91,44 см
1 фатом (Fathom) = 2 ярдам = 6 футам = 1,83 м
1 род (Rod) = 5,5 ярда = 5,03 м
1 миля уставная (Statute mile) = 1760 ярдам = 1,609 км
1 миля морская (Mile nautical) = 1,852 км

Измерение площади в других единицах

1 а (ар — *устар.*) = 100 м²
1 б (барн, в физике — *до 01.01. 1980 г.*) = 10^{-28} м² = 10^{-24} см² (точно)

Измерение площади в старых русских мерах

1 кв. дюйм = 6,45 см²
1 кв. аршин = 0,5058 м²
1 кв. сажень = 4,55 м²
1 десятина = 2400 кв. саженям = 1,09 га

Измерение площади в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 кв. мил = 10^{-6} кв. дюйма = $6,45 \cdot 10^{-4}$ мм²
1 круг. мил (Circular mil) = 0,785 кв. мила = $5,067 \cdot 10^{-4}$ мм²
1 кв. линия (Square line) малая = 4,48 мм²

1 кв. линия большая = 10^4 кв. мил = 6,45 мм²
1 кв. дюйм = 144 кв. мал. линиям = 100 кв. больш. линиям = 6,45 см²
1 кв. фут = 144 кв. дюймам = 929,0 см²
1 кв. ярд = 9 кв. футам = 8361 см²
1 кв. фатом = 4 кв. ярдам = 3,34 м²
1 акр (Acre) = 43 560 кв. футам = 4047 м²
1 кв. миля = 640 акрам = 259 га = $259 \cdot 10^4$ м²

Измерение объема в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 куб. дюйм (Cubic inch) = 16,4 см³
1 куб. фут = 1728 куб. дюймам = 28,3 л = 0,0283 м³
1 куб. ярд = 27 куб. футам = 764,5 л = 0,765 м³
1 куб. фатом = 8 куб. ярдам = 6,12 м³

Измерение вместимости для сыпучих тел и жидкостей в Великобритании

1 пинта (Pint) = 0,568 л
1 кварта (Quart) = 2 пинтам = 1,136 л
1 галлон (Gallon) = 4 квартам = 4,546 л
1 бушель (Bushel) = 8 галлонам = 36,37 л

Измерение вместимости в США для сыпучих тел

1 пинта = 0,55 л
1 кварта = 1,1 л
1 галлон = 4,4 л
1 бушель = 35,24 л
1 баррель = 115,6 л

Для жидкостей

1 пинта = 0,47 л
1 кварта = 0,95 л
1 галлон = 3,78 л
1 баррель = 159 л

Измерение массы в других единицах

1 ц (центнер — *до 01.01. 1980 г.*, в сельском хозяйстве) = 0,1 т = 100 кг (точно)
1 кар (карат — для драгоценных камней и жемчуга — *до срока, который будет установлен*) = 0,2 г (точно)
1 г-экв (грамм-эквивалент) — масса вещества в граммах, численно равная его эквивалентной массе
1 г-атом (грамм-атом) — масса вещества в граммах, численно равная его атомной массе

Измерение массы в старых русских мерах

1 доля = 44,4 мг
1 золотник = 96 долям = 4,27 г
1 лот = 3 золотникам = 12,8 г
1 фунт = 32 лотам = 409,5 г
1 пуд = 40 фунтам = 16,381 кг

Измерение массы в мерах, применяемых в Великобритании

1 гран (Grain) = 64,8 мг
1 весовое пенни (Penny weight) = 24 грамма = 1,555 г
1 тройская унция (Troy ounce) = 20 вес. пенни = 31,10 г
1 тройский фунт (Troy pound) = 12 тр. унциям = 373,2 г
1 унция (Ounce) = 28,35 г
1 фунт (Pound) = 16 унциям = 453,6 г

1 центнер (Centumweight) = 112 фунтам = 50,8 кг
 1 тонна короткая (Short ton) = 907,2 кг
 1 тонна длинная (Long ton) = 20 центнерам = 1016 кг

Измерение массы в мерах, применяемых в США

1 гран = 64,8 мг
 1 унция = 28,35 г
 1 фунт = 453,6 г
 1 центнер = 100 фунтам = 45,36 кг
 1 тонна = 20 центнерам = 907,2 кг
 1 милльер (Millier) = 1000 кг

Измерение силы в других единицах

1 паундаль (Poundal) = 0,138 Н
 1 фунт-сила (Pound-force) = 4,45 Н
 1 дин (дина — до 01.01. 1980 г.) = 10^{-5} Н
 1 гс (грамм-сила — до 01.01. 1980 г.) = $9,80665 \cdot 10^{-3}$ Н (точно)
 1 тс (тонна-сила — до 01.01. 1980 г.) = 9806,65 Н (точно)
 1 кгс (килограмм-сила — до 01.01. 1980 г.) = 9,80665 Н (точно)
 1 кр (килопонд — до 01.01. 1980 г.) = 9,80665 Н (точно)
 1 сн (стен — устар.) = 1000 Н

Измерение работы и энергии в других единицах

1 эрг (эрг — до 01.01. 1980 г.) = $1 \cdot 10^{-7}$ Дж
 1 у. е. (углеродная единица) = 931,16 МэВ = 1,4918 $\cdot 10^{10}$ Дж
 1 э. (E = mc^2) = $2,1471 \cdot 10^{13}$ кал = $5,6099 \cdot 10^{26}$ МэВ = $8,9876 \cdot 10^{13}$ Дж
 1 кал (калория международная — до 01.01. 1980 г.) = 4,1868 Дж (точно)
 1 кВт·ч (киловатт-час) = $3,60 \cdot 10^6$ Дж
 1 фут-паундаль (Foot-poundal) = 0,0421 Дж
 1 фут-фунт-сила (Foot-pound-force) = 0,324 кал = 1,356 Дж
 1 литр-атмосфера технич. (л·ат — устар.) = 98,1 Дж
 1 литр-атмосфера физич. (л·атм — устар.) = 24,2 кал = 10,33 кгс·м = 101,3 Дж
 1 Британская термич. единица (British thermal unit — BTU) = 252 кал = $293 \cdot 10^{-6}$ кВт·ч = 1055 Дж
 1 вольт-фарадей = $96,5 \cdot 10^3$ Дж
 1 лошадиная сила-час (л. с·ч — до 01.01. 1980 г.) = $2,648 \cdot 10^6$ Дж
 1 терм (Therm) = 10^5 BTU = 29,3 кВт·ч = $105,5 \cdot 10^6$ Дж

Измерение мощности в других единицах

1 BTU в час = 0,293 Вт
 1 килокалория в час (до 01.01. 1980 г.) = 1,163 Вт (точно)
 1 л. с. (лошадиная сила — до 01.01. 1980 г.) = 75 кгс·м/с = 735,499 Вт
 1 лошадиная сила англ. = 76,04 кгс·м/с = 745,7 Вт

Измерение давления в других единицах

1 кгс/см² (до 01.01. 1980 г.) = 98 066,5 Па (точно)

1 фунт-сила на кв. фут (устар.) = 47,88 Па
 1 пьеза (устар.) = 1000 Па
 1 ат (атмосфера технич. — устар.) = 1 кгс/см² = $9,81 \cdot 10^4$ Па
 1 атм (атмосфера физич. — устар.) = $10,1325 \cdot 10^4$ Па
 1 бар (бар — до срока, который будет установлен) = 1,02 ат = 10^5 Па
 1 мм рт. ст. (миллиметр ртутного столба — до 01.01. 1980 г.) = $13,595$ кгс/м² = 133,322 Па
 1 мм вод. ст. (миллиметр водяного столба — до 01.01. 1980 г.) = 1 кгс/м² = 9,80665 Па
 1 дюйм ртутного столба (устар.) = 3386,4 Па
 1 паундаль на кв. фут (устар.) = 1,49 Па
 1 фут водяного столба (устар.) = $2,99 \cdot 10^3$ Па

Измерение скорости в других единицах

1 км/ч = 0,278 м/с
 1 уз (узел, в морской навигации — до срока, который будет установлен) = 1 морская миля в час = 1,852 км/ч = 0,514 м/с
 1 фут в секунду (устар.) = 0,305 м/с

Измерение ускорения в других единицах

1 фут в секунду за секунду (устар.) = 0,305 м/с²

Измерение частоты вращения

1 об/с (оборот в секунду — до срока, который будет установлен) = 1 с⁻¹
 1 об/мин (оборот в минуту — до срока, который будет установлен) = 1/60 с⁻¹

Децибел и непер

Для характеристик изменения какой-либо величины, если значения ее изменяются на несколько порядков, применяется десятичный или натуральный логарифм отношения двух значений этой величины. Например, в электротехнике постоянная ослабления четырехполюсника, фильтра, линии при согласованной нагрузке

$$A = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}; \quad A = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2},$$

где P_1 и P_2 — мощности на входе и выходе, или

$$A = 20 \lg \frac{U_1}{U_2}; \quad A = \ln \frac{U_1}{U_2},$$

где U_1 и U_2 — напряжения на входе и выходе.

В обоих случаях полученная величина A безразмерная, но в первом случае указывается, что A измерена в децибелах (дБ), а во втором — в неперах (Нп). Разность уровней двух мощностей равна 1 дБ, если десятичный логарифм их отношения равен 0,1; разность уровней двух мощностей равна 1 Нп, если натуральный логарифм их отношения равен 2.

$$1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}; \quad 1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ}.$$

1-3. ЕДИНИЦЫ АКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

§ 1.3]

Единицы акустических величин

13

Наименование величин	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц системы	
			русское	международное	СГС (гауссовой)	МКГСС (технической)
Давление звуковое	паскаль	$\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2) = \text{Н}/\text{м}^2$	Па	Pa	$10 \text{ дин}/\text{см}^2$	$0,102 \text{ кгс}/\text{м}^2$
Акустическое сопротивление	паскаль-секунда на метр в кубе	$\text{кг}/(\text{м}^4 \cdot \text{с})$	$\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$	$\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$	$10^{-5} \text{ г}/(\text{см}^4 \cdot \text{с})$	$0,102 \text{ кгс} \cdot \text{с}/\text{м}^3$
Удельное акустическое сопротивление	паскаль-секунда на метр	$\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$	$0,1 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	$0,102 \text{ кгс} \cdot \text{с}/\text{м}^2$
Механическое сопротивление	ньютон-секунда на метр	$\text{кг}/\text{с}$	$\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}$	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$	$10^3 \text{ г}/\text{с}$	$0,102 \text{ кгс} \cdot \text{с}/\text{м}$
Звуковая энергия	джоуль	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$	Дж	J	10^7 эрг	$0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м}$
Поток звуковой энергии (звуковая мощность)	ватт	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3 = \text{Дж}/\text{с}$	Вт	W	$10^7 \text{ эрг}/\text{с}$	$0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{с}$
Интенсивность звука	ватт на метр в квадрате	$\text{кг}/\text{с}^3$	$\text{Вт}/\text{м}^2$	W/m^2	$10^3 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	$0,102 \text{ кгс}/(\text{м} \cdot \text{с})$
Плотность звуковой энергии	джоуль на метр в кубе	$\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$	$\text{Дж}/\text{м}^3$	J/m^3	$10 \text{ эрг}/\text{см}^3$	$0,102 \text{ кгс}/\text{м}^2$

Примечание. При записи уровней звукового давления, звуковой мощности и интенсивности звука в децибелах (дБ) применяются соответственно следующие исходные значения: $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$; 10^{-12} Вт и $10^{-12} \text{ Вт}/\text{м}^2$.

1-4. ЕДИНИЦЫ ТЕПЛОВЫХ И СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН, ВЕЛИЧИН, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОАКТИВНОСТЬ

Единицы тепловых величин в Международной системе СИ

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы			Единицы в неметрической системе, основанной на калории		
			русское	международное	содержит единиц неметрической системы	Наименование единицы	Обозначение	Содержит единиц в системе СИ
Температура, разность температур	кельвин	К	К	К	1	—	—	—
Количество теплоты, термодинамический потенциал, энтальпия	джоуль	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$	Дж	J	0,239	калория (межд.)	кал	4,1868 (точно)
Теплоемкость системы, энтропия	джоуль на кельвин	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{с}^2 \cdot \text{К})$	Дж/К	J/K	$0,239 \cdot 10^{-3}$	килокалория на кельвин	ккал/К	$4,1868 \cdot 10^3$
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	джоуль на килограмм-кельвин	$\text{м}^2 / (\text{с}^2 \cdot \text{К})$	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)	$0,239 \cdot 10^{-3}$	килокалория на килограмм-кельвин	ккал/(кг·К)	$4,1868 \cdot 10^3$
Удельное количество теплоты, удельный термодинамический потенциал	джоуль на килограмм	$\text{м}^2 / \text{с}^2$	Дж/кг	J/kg	$0,239 \cdot 10^{-3}$	килокалория на килограмм	ккал/кг	$4,1868 \cdot 10^3$
Температурный градиент	кельвин на метр	К/м	К/м	К/м	1	кельвин на метр	К/м	1
Тепловой поток	ватт	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3$	Вт	W	0,860	килокалория в час	ккал/ч	1,163
Поверхностная плотность теплового потока	ватт на кв. метр	$\text{кг} / \text{с}^3$	Вт/м ²	W/м ²	0,860	килокалория в час на кв. метр	ккал/(м ² ·ч)	1,163
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	$\text{кг} \cdot \text{м} / (\text{с}^3 \cdot \text{К})$	Вт/(м·К)	W/(m·K)	0,860	килокалория в час на метр-кельвин	ккал/(ч·м·К)	1,163
Коэффициент теплопередачи, теплообмена	ватт на кв. метр-кельвин	$\text{кг} / (\text{с}^3 \cdot \text{К})$	Вт/(м ² ·К)	W/(m ² ·K)	0,860	килокалория на кв. метр, час и кельвин	ккал/(м ² ·ч·К)	1,163
Температуропроводность	кв. метр в секунду	$\text{м}^2 / \text{с}$	$\text{м}^2 / \text{с}$	$\text{м}^2 / \text{s}$	1	кв. метр в секунду	$\text{м}^2 / \text{с}$	1
Температурный коэффициент	кельвин в минус первой степени	К^{-1}	К^{-1}	К^{-1}	1	кельвин в минус первой степени	К^{-1}	1

1 термия= 10^6 кал; 1 фригория= -1 ккал.

Примечание. Так как разность температур может выражаться не только в кельвинах, но и градусах Цельсия, то во всех наименованиях и обозначениях можно осуществить соответствующую замену без изменения коэффициента пересчета.

Сравнение температурных шкал

$$t^{\circ}\text{C} = 0,555 (t^{\circ}\text{F} - 32);$$

$$t^{\circ}\text{C} = T - 273,15,$$

где $t^{\circ}\text{C}$ — температура в градусах по шкале Цельсия; $t^{\circ}\text{F}$ — температура в градусах по шкале Фаренгейта; T — температура в кельвинах (единицах термодинамической температуры).

Единицы световых величин в Международной системе СИ

Наименование величин	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы	
			русское	международное
Сила света	кандела	кд	кд	cd
Световой поток	люмен	кд·ср	лм	lm
Световая энергия	люмен-секунда	кд·ср·с	лм·с	lm·s
Освещенность	люкс	кд·ср/м ²	лк	lx
Светимость	люмен на кв. метр	кд·ср/м ²	лм/м ²	lm/m ²
Яркость	кандела на кв. метр	кд/м ²	кд/м ²	cd/m ²
Световая экспозиция	люкс-секунда	кд·ср·с/м ²	лк·с	lx·s
Энергия излучения	джоуль	кг·м ² /с ²	Дж	J
Поток излучения; мощность излучения	ватт	кг·м ² /с ³	Вт	W
Световой эквивалент потока излучения	люмен на ватт	кд·ср·с ³ /(кг·м ²)	лм/Вт	lm/W
Поверхностная плотность потока излучения	ватт на кв. метр	кг/с ³	Вт/м ²	W/m ²
Энергетическая сила света (сила излучения)	ватт настерадиан	кг·м ² /(с ³ ·ср)	Вт/ср	W/sr
Энергетическая яркость (лучистость)	ватт настерадиан и кв. метр	кг/(с ³ ·ср)	Вт/(ср·м ²)	W/(sr·m ²)
Энергетическая освещенность (облученность)	ватт на кв. метр	кг/с ³	Вт/м ²	W/m ²
Энергетическая светимость (излучательность)	ватт на кв. метр	кг/с ³	Вт/м ²	W/m ²

Единицы величин, характеризующих ионизирующие излучения и радиоактивность, в Международной системе СИ

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единицы других систем ¹
			русское	международное	
Активность нуклида в радиоактивном источнике	беккерель	с ⁻¹	Бк	Bq	2,72·10 ⁻¹¹ кюри (Ки)
Интенсивность излучения	ватт на кв. метр	кг/с ³	Вт/м ²	W/m ²	10 ⁸ эрг/(с·см ²)
Поглощенная доза излучения, керма	грэй	м ² /с ²	Гр	Gy	100 рад = 10 ⁴ эрг/г
Мощность поглощенной дозы, мощность кермы	грэй в секунду	м ² /с ³	Гр/с	Gy/s	100 рад/с
Эквивалентная доза излучения	джоуль на килограмм	м ² /с ²	Дж/кг	J/kg	100 бэр
Экспозиционная доза (рентгеновского и гамма-излучений)	кулон на килограмм	А·с/кг	Кл/кг	C/kg	3,85·10 ⁸ рентген (Р) = 3·10 ⁸ ед. заряда СГС/г
Мощность экспозиционной дозы	ампер на килограмм	А/кг	А/кг	A/kg	3,85·10 ⁸ Р/с = 3·10 ⁶ ед. тока СГС/г

¹ Допускались к применению до 1.01.1980 г. следующие единицы:

1 кюри (Ки) = 3,70·10¹⁰ Бк (точно);

1 рад = 10⁻² Гр (Дж/кг) = 100 эрг/г;

1 рентген (Р) = 2,58·10⁻⁴ Кл/кг (точно);

1 бэр = 0,01 Дж/кг.

1-5. ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Единицы Международной системы СИ

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц системы		
			русское	международное	СГС-симметричная	СГСМ	СГСЭ
<i>Электрические</i>							
Сила электрического тока	ампер	A	A	A	$3 \cdot 10^9$	0,1	$3 \cdot 10^9$
Количество электричества, заряд	кулон	$A \cdot c = Кл$	Кл	C	$3 \cdot 10^9$	0,1	Совпадает с системой СГС
Электрический потенциал, напряжение, ЭДС	вольт	$кг \cdot м^2 / (A \cdot c^3) = В$	В	V	$1/300$	10^8	
Напряженность электрического поля	вольт на метр	$кг \cdot м / (A \cdot c^3) = В/м$	В/м	V/m	$10^{-4}/3$	10^6	
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	$A^2 \cdot c^4 / (кг \cdot м^3)$	Ф/м	F/m	—	—	
Электрический момент диполя	кулон-метр	$A \cdot c \cdot м = Кл \cdot м$	Кл·м	C·m	$3 \cdot 10^{11}$	10	
Электрическое смещение (индукция)	кулон на кв. метр	$A \cdot c / м^2 = Кл/м^2$	Кл/м ²	C/m ²	$4 \pi \cdot 3 \cdot 10^3$	$4 \pi \cdot 10^{-5}$	
Поляризованность	кулон на кв. метр	$A \cdot c / м^2 = Кл/м^2$	Кл/м ²	C/m ²	$3 \cdot 10^5$	10^{-5}	
Электрическая емкость	фарад	$A^2 \cdot c^4 / (кг \cdot м^2) = c / Ом$	Ф	F	$9 \cdot 10^{11}$ (см)	10^{-9}	
Плотность тока	ампер на кв. метр	$A/м^2$	A/м ²	A/m ²	$3 \cdot 10^5$	10^{-5}	
Электрическое сопротивление	ом	$кг \cdot м^2 / (A^2 \cdot c^3) = В/А$	Ом	Ω	$10^{-11}/9$	10^9	
Электрическая проводимость	сименс	$A^2 \cdot c^3 / (кг \cdot м^2) = 1/Ом$	См	S	$9 \cdot 10^{11}$	10^{-9}	
Удельное электрическое сопротивление*	ом-метр	$кг \cdot м^3 / (A^2 \cdot c^3) = Ом \cdot м$	Ом·м	Ω·m	$10^{-9}/9$	10^{11}	
Удельная электрическая проводимость**	сименс на метр	$A^2 \cdot c^3 / (кг \cdot м^3) = 1/Ом \cdot м$	См/м	S/m	$9 \cdot 10^9$	10^{-11}	
Подвижность электронов	метр в секунду, деленный на вольт на метр	$A \cdot c^2 / кг = м^2 / (В \cdot c)$	$\frac{м/с}{В/м}$	$\frac{m/s}{V/m}$	$3 \cdot 10^6$	10^{-4}	

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц системы		
			русское	международное	СГС-симметричная	СГСМ	СГСЭ
Полная мощность	вольт-ампер	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3$	В·А	V·A	10^7	10^7	
Реактивная мощность	вар	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3$	вар	var	10^7	10^7	
<i>Магнитные</i>							
Магнитный поток	вебер	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{А} \cdot \text{с}^2) = \text{В} \cdot \text{с}$	Вб	Wb	10^8 (максвелл, Мкс)	Совпадает с системой СГС	1/300
Магнитная индукция	тесла	$\text{кг} / (\text{А} \cdot \text{с}^2) = \text{В} \cdot \text{с} / \text{м}^2$	Тл	T	10^4 (гаусс, Гс)		$10^{-6}/3$
Абсолютная магнитная проницаемость	генри на метр	$\text{кг} \cdot \text{м} / (\text{А}^2 \cdot \text{с}^2)$	Гн/м	H/m	—		—
Магнитный момент электрического тока, магнитный момент диполя	ампер-кв. метр	$\text{А} \cdot \text{м}^2$	$\text{А} \cdot \text{м}^2$	$\text{А} \cdot \text{м}^2$	10^3		$3 \cdot 10^{13}$
Намагниченность	ампер на метр	$\text{А} / \text{м}$	$\text{А} / \text{м}$	$\text{А} / \text{м}$	10^{-3} (гаусс или эрстед)		$3 \cdot 10^7$
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	$\text{А} / \text{м}$	$\text{А} / \text{м}$	$\text{А} / \text{м}$	$4\pi \cdot 10^{-3}$ (эрстед, Э)		$4\pi \cdot 3 \cdot 10^7$
Индуктивность, взаимная индуктивность	генри	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{А}^2 \cdot \text{с}^2) = \text{В} \cdot \text{с} / \text{А} = \text{Вб} / \text{А} = \text{Ом} \cdot \text{с}$	Гн	H	10^9 (см)		$10^{-11}/9$
Магнитодвижущая сила, разность скалярных магнитных потенциалов	ампер	А	А	А	0,4π (гильберт, Гб)		$4\pi \cdot 3 \cdot 10^9$
Магнитное сопротивление	ампер на вебер	$\text{с}^2 \cdot \text{А}^2 / (\text{м}^2 \cdot \text{кг}) = \text{А} / \text{Вб} = 1 / \text{Гн}$	$\text{А} / \text{Вб}$	$\text{А} / \text{Wb}$	$4\pi \cdot 10^{-9}$		$4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}$
Магнитная проводимость	вебер на ампер	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} / (\text{с}^2 \cdot \text{А}^2) \approx \text{Гн}$	$\text{Вб} / \text{А}$	$\text{Wb} / \text{А}$	$10^9 / 4\pi$		$10^{-11} / 4\pi \cdot 9$
Векторный магнитный потенциал	вебер на метр	$\text{кг} \cdot \text{м} / (\text{А} \cdot \text{с}^2) = \text{В} \cdot \text{с} / \text{м}$	$\text{Вб} / \text{м}$	Wb / m	10^9		1/3

* $1 \text{ Ом} \cdot \text{см} = 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

** $1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1} = 100 \text{ См} / \text{м}$; $1 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2 = 10^6 \text{ См} / \text{м} = 1 \text{ МСм} / \text{м}$.

Единицы электрических и магнитных величин, допускаемые наравне с единицами СИ до 01.01.1980 г.

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		русское	международное	
Удельное электрическое сопротивление	ом-квадратный миллиметр на метр	Ом·мм ² /м	Ω·mm ² /m	10 ⁻⁶ Ом·м
Магнитный поток	максвелл	Мкс	Мх	10 ⁻⁸ Вб
Магнитная индукция	гаусс	Гс	Gs	10 ⁻⁴ Тл
Магнитодвижущая сила, разность скалярных магнитных потенциалов	гильберт	Гб	Gb	(10/4 π) А
Напряженность магнитного поля	эрстед	Э	Ое	(10 ³ /4 π) А/м
Энергия	эрг	эрг	erg	1·10 ⁻⁷ Дж

1-6. МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ И ИХ НАИМЕНОВАНИЯ

Наименование приставки	Обозначение приставки		Множитель (отношение к главной единице)
	русское	международное	
экса	Э	E	10 ¹⁸
пета	П	P	10 ¹⁵
тера	Т	T	10 ¹²
гига	Г	G	10 ⁹
мега	М	M	10 ⁶
кило	к	k	10 ³
гекто	г	h	10 ²
дека	да	da	10 ¹
деци	д	d	10 ⁻¹
санти	с	c	10 ⁻²
милли	м	m	10 ⁻³
микро	мк	μ	10 ⁻⁶
нано	н	n	10 ⁻⁹
пико	п	p	10 ⁻¹²
фемто	ф	f	10 ⁻¹⁵
атто	а	a	10 ⁻¹⁸

Примеры: 1 килоом = 1 кОм = 1000 Ом = 10³ Ом; 1 миллиампер = 1 мА = 10⁻³ А; 1 микрофарад = 1 мкФ = 10⁻⁶ Ф.

Примечания: 1. Присоединение к наименованию единицы двух и более приставок подряд не допускается. Например, вместо наименования единицы «микромикрофарад» следует писать наименование «пикофарад».

2. Кратные и дольные единицы в принципе следует выбирать таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000.

1-7. ВАЖНЕЙШИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ (ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ)

Магнитная постоянная

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ Гн/см.}$$

Электрическая постоянная

$$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c_0^2 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \approx$$

$$\approx \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ Ф/м} = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} \text{ Ф/см,}$$

где $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

Волновое сопротивление вакуума

$$\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 376,7 \text{ Ом.}$$

Гравитационная постоянная

$$\begin{aligned} G &= 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2) = \\ &= 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2} = \\ &= 6,6720 \cdot 10^{-8} \text{ дин} \cdot \text{см}^2/\text{г}^2. \end{aligned}$$

Нормальное ускорение

$$\begin{aligned} g_n &= 9,80665 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} = \\ &= 980665 \text{ мгал} \quad (1 \text{ гал} = 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}). \end{aligned}$$

Атомная единица массы (а.е.м.): 1/12 часть массы атома нуклида ¹²C

$$\text{а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Элементарный заряд (заряд электрона)

$$\begin{aligned} e &= 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \approx \\ &\approx 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ.} \end{aligned}$$

Масса покоя электрона

$$\begin{aligned} m_e &= 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = \\ &= 9,109534 \cdot 10^{-28} \text{ г} = 5,4858026 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.} \end{aligned}$$

Отношение заряда электрона к его массе

$$\begin{aligned} e/m_e &= 1,7588047 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг} = \\ &= 1,7588047 \cdot 10^8 \text{ Кл/г.} \end{aligned}$$

Масса покоя протона

$$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг} =$$

$$= 1,6726485 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 1,007276470 \text{ а.е.м.}$$

Масса покоя нейтрона

$$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг} =$$

$$= 1,6749543 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 1,008665012 \text{ а.е.м.}$$

Масса атома водорода

$$1,6735595 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 1,007825036 \text{ а.е.м.}$$

Отношение масс протона и электрона

$$m_p/m_e = 1836,15152.$$

Магнетон Бора

$$eh/4\pi m_e = \mu_B = 9,274078 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл} =$$

$$= 0,9274078 \cdot 10^{-20} \text{ эрг/Гс.}$$

Масса покоя мюона

$$m_\mu = 1,883566 \cdot 10^{-28} \text{ кг} = 0,11342920 \text{ а.е.м.}$$

Отношение массы мюона к массе электрона

$$m_\mu/m_e = 206,76865.$$

Ядерный магнетон

$$\mu_N = eh/4\pi m_p = 5,050824 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл.}$$

Магнитный момент электрона

$$\mu_e = 9,284832 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл.}$$

Магнитный момент протона

$$\mu_p = 1,4106171 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл.}$$

Магнитный момент мюона

$$\mu_\mu = 4,490474 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл.}$$

Отношение магнитного момента электрона к магнитному моменту протона

$$\mu_e/\mu_p = 658,2106880.$$

Отношение магнитного момента мюона к магнитному моменту протона

$$\mu_\mu/\mu_p = 3,1833402.$$

Первая постоянная излучения

$$c_1 = 2\pi\hbar c_0^2 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}\cdot\text{м}^2.$$

Вторая постоянная излучения

$$c_2 = \hbar c_0/k = 0,01438786 \text{ м}\cdot\text{К.}$$

Постоянная Планка

$$\hbar = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} =$$

$$= 6,626176 \cdot 10^{-27} \text{ эрг}\cdot\text{с.}$$

Постоянная Больцмана

$$k = R/N_A = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} =$$

$$= 1,38662 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/К.}$$

Постоянная Стефана — Больцмана

$$\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4) =$$

$$= 5,67032 \cdot 10^{-5} \text{ эрг/(см}^2\cdot\text{К}^4\cdot\text{с).}$$

Постоянная Вина

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м}\cdot\text{К} = 0,2898 \text{ см}\cdot\text{К.}$$

Универсальная газовая постоянная

$$R = pV/T = 8,31441 \text{ Дж/(К}\cdot\text{моль),}$$

где давление p — в Па, нормальный объем V — в м³;

$$R = 8,31441 \cdot 10^7 \text{ эрг/(К}\cdot\text{моль),}$$

если p — в дин/см²; V — в см³;

$$R = 62\,350 \text{ мм рт.ст.}\cdot\text{см}^3/(\text{К}\cdot\text{моль),}$$

если p — в мм рт.ст.; V — в см³.

Температурный коэффициент объемного расширения идеальных газов

$$\alpha = 0,00366 \text{ К}^{-1}.$$

Число (постоянная) Авогадро

$$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Число Лошмидта

$$N_L = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Число (постоянная) Фарадея

$$F = N_A e = 96\,484,56 \text{ Кл/моль.}$$

Калория международная (кал):
4,1868 Дж (точно).

Калория термохимическая (кал_{тх}):
4,1840 Дж.

Калория 15-градусная (кал₁₅):
4,1855 Дж.

1-8. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1							1 H 1,0079 водород	2 He 4,00260 гелий		
2	3 Li 6,941 литий	4 Be 9,01218 бериллий	5 10,81 B бор	6 12,011 C углерод	7 14,0067 N азот	8 15,9994 O кислород	9 18,99840 F фтор	10 Ne 20,179 неон		
3	11 Na 22,98977 натрий	12 Mg 24,305 магний	13 26,98154 Al алюминий	14 28,086 Si кремний	15 30,97376 P фосфор	16 32,06 S сера	17 35,453 Cl хлор	18 Ar 39,948 аргон		
4	19 K 39,098 калий	20 Ca 40,08 кальций	21 Sc 44,9559 скандий	22 Ti 47,90 титан	23 V 50,9414 ванадий	24 Cr 51,996 хром	25 Mn 54,9380 марганец	26 Fe 55,847 железо	27 Co 58,9332 кобальт	28 Ni 58,70 никель
	29 Cu 63,546 медь	30 Zn 65,38 цинк	31 69,72 Ga галлий	32 72,59 Ge германий	33 74,9216 As мышьяк	34 78,96 Se селен	35 79,904 Br бром	36 K _r 83,80 криптон		
5	37 Rb 85,4678 рубидий	38 Sr 87,62 стронций	39 Y 88,9059 иттрий	40 Zr 91,22 цирконий	41 Nb 92,9064 ниобий	42 Mo 95,94 молибден	43 Tc 98,9062 технеций	44 Ru 101,07 рутений	45 Rh 102,9055 родий	46 Pd 106,4 палладий
	47 Ag 107,868 серебро	48 112,40 Cd кадмий	49 114,82 In индий	50 118,69 Sn олово	51 121,75 Sb сурьма	52 127,60 Te теллур	53 126,9045 I йод	54 Xe 131,30 ксенон		

Периоды	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
6	55 Cs 132,9054 цезий	56 Ba 137,34 барий	57* La 138,9055 лантан	72 Hf 178,49 гафний	73 Ta 180,9479 тантал	74 W 183,85 вольфрам	75 Re 186,207 рений	76 Os 190,2 осмий	77 Ir 192,22 иридий	78 Pt 195,09 платина
	79 Au 196,9665 золото	80 Hg 200,59 ртуть	81 204,37 Tl таллий	82 207,2 Pb свинец	83 208,9804 Bi висмут	84 [209] Po полоний	85 [210] At астат	86 [222] Rn радон		
7	87 Fr [223] франций	88 Ra 226,0254 радий	89** Ac [227] актиний	104 Pu [261] курчатовий	105 (Ns) (нильсборий)	В квадратных скобках приведены массовые числа наиболее устойчивых изотопов. В круглых скобках приведены необщепринятые символы и названия				

*Лантаноиды

58 Ce 140,12 церий	59 Pr 140,9077 празеодим	60 Nd 144,24 неодим	61 Pm [145] прометий	62 Sm 150,4 самарий	63 Eu 151,96 европий	64 Gd 157,25 гадолиний
65 Tb 158,9254 тербий	66 Dy 162,50 диспрозий	67 Ho 164,9304 гольмий	68 Er 167,26 эрбий	69 Tm 168,9342 тулий	70 Yb 173,04 иттербий	71 Lu 174,97 лютеций

**Актиноиды

90 Th 232,0381 торий	91 Pa 231,0359 протактиний	92 U 238,029 уран	93 Np 237,0482 нептуний	94 Pu [244] плутоний	95 Am [243] америций	96 Cm [247] курий
97 Bk [247] берклий	98 Cf [251] калифорний	99 Es [254] эйшштейний	100 Fm [257] фермий	101 Md [258] менделевий	102 (No) [255] (нобелий)	103 (Lr) [256] лоуренсий

1-9. БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

В качестве буквенных обозначений величин должны применяться буквы латинского и греческого алфавитов при необходимости с нижними и (или) верхними индексами.

Для изменяющихся во времени величин, например ЭДС, напряжения, потенциала, заряда, тока, плотности тока, следует применять обозначения: a — мгновенное значение; A — действующее значение (для периодически изменяющихся величин); A_m — амплитуда (для гармонически изменяющихся величин). Здесь под a , A , A_m понимается любая из изменяющихся во времени величин.

Операторные величины следует обозначать по типу $I(p)$ или $I(s)$ — операторный ток.

Комплексные величины следует обозначать по типу

$$\underline{A} = A' + jA'' = \operatorname{Re} \underline{A} + j \operatorname{Im} \underline{A} = A e^{j\alpha} = |\underline{A}| e^{j\alpha} = A \angle \alpha = |\underline{A}| \angle \alpha,$$

где $\underline{A}$ — любая из комплексных величин; $A' = \operatorname{Re} \underline{A}$ — ее действительная часть; $A'' = \operatorname{Im} \underline{A}$ — ее мнимая часть; $A = |\underline{A}|$ — модуль и α — аргумент комплексной величины.

Сопряженная комплексная величина

$$\underline{A}^* = A' - jA'' = \operatorname{Re} \underline{A} - j \operatorname{Im} \underline{A} = A e^{-j\alpha} = |\underline{A}| e^{-j\alpha} = A \angle -\alpha = |\underline{A}| \angle -\alpha.$$

Для комплексной величины, каждая из составляющих которой имеет собственное буквенное обозначение, следует применять обозначения типа

$$\underline{Z} = \operatorname{Re} \underline{Z} + j \operatorname{Im} \underline{Z} = r + jx,$$

где $\underline{Z}$ — комплексное сопротивление; r — активное и x — реактивное сопротивления.

Допускается модули комплексных величин, не являющихся изображениями функций времени, обозначать строчными буквами. Допускается для обозначения комплексных действующих и амплитудных значений величин, являющихся синусоидальными функциями времени, вместо выше указанных обозначений ставить точку над основным обозначением величины, например: $\dot{I}$ — комплексный действующий ток; $\dot{\Phi}_m$ — комплексная амплитуда магнитного потока.

Для основных электрических и магнитных величин должны применяться следующие обозначения:

Латинский алфавит

A — плотность тока линейная; потенциал магнитный векторный.
 B — индукция магнитная.

B , b — проводимость реактивная.
 C — емкость.
 c — скорость распространения электромагнитных волн (c_0 — в вакууме).
 D — смещение электрическое.
 E — напряженность электрического поля.
 E , e — электродвижущая сила (ЭДС).
 F — магнитодвижущая сила.
 f — частота колебаний (f_0 — резонансная).
 G , g — проводимость активная.
 H — напряженность магнитного поля; передаточная функция.
 I , i — ток.
 J — плотность тока.
 k — коэффициент связи.
 L — индуктивность собственная.
 M — индуктивность взаимная; намагниченность.
 m — магнитный момент; число фаз многофазной системы цепей.
 N — число витков; коэффициент размагничивания.
 n — коэффициент трансформации; отношение чисел витков.
 P — мощность; мощность активная; поляризованность.
 p — момент электрический; мощность удельная; число пар полюсов.
 Q — мощность реактивная; добротность.
 Q , q — заряд.
 R , r — сопротивление электрическое; сопротивление активное.
 S — мощность полная.
 T — период колебаний.
 U , u — напряжение.
 W — энергия электромагнитная.
 w — число витков; энергия электромагнитная удельная.
 X , x — сопротивление реактивное.
 Y , y — проводимость полная.
 Z , z — сопротивление полное.

Греческий алфавит

A — постоянная ослабления.
 α — коэффициент ослабления.
 B — постоянная фазы.
 β — коэффициент фазы.
 Γ — постоянная передачи.
 γ — коэффициент распространения; проводимость электрическая удельная.
 δ — коэффициент затухания; угол потерь.
 ϵ — проницаемость диэлектрическая (ϵ_0 — электрическая постоянная).
 θ — декремент колебаний логарифмический.
 κ — восприимчивость магнитная.
 λ — длина электромагнитной волны; коэффициент мощности.
 μ — проницаемость магнитная (μ_0 — магнитная постоянная).
 Π — вектор Пойнтинга.

ρ — коэффициент отражения; плотность электрического заряда объемная; сопротивление электрическое удельное.
 σ — плотность электрического заряда поверхностная; проводимость электрическая удельная.
 τ — плотность электрического заряда линейная; постоянная времени.
 Φ — магнитный поток.
 φ — потенциал электрический; сдвиг фаз между напряжением и током.
 χ — восприимчивость диэлектрическая.
 Ψ — потокоцепление.
 Ω, ω — частота колебаний угловая.

Примеры применения индексов

ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость.
 $Z_{\text{в}}$ — волновое сопротивление.
 $r_{\text{вт}}$ — внутреннее сопротивление.
 z_c — характеристическое сопротивление.
 $u_{\text{вх}}$ — входное напряжение.
 $u_{\text{вых}}$ — выходное напряжение.
 $C_{\text{дин}}$ — емкость динамическая.
 $L_{\text{диф}}$ — индуктивность дифференциальная.
 r_k — сопротивление короткого замыкания.

W_m — энергия магнитная.
 I_m — амплитуда тока.
 i_{max} — максимальное значение тока.
 i_{min} — минимальное значение тока.
 μ_r — относительная магнитная проницаемость.
 I_{Σ} — суммарный ток.
 U_{ϕ} — фазное напряжение.
 r_x — сопротивление холостого хода.
 $a_* = a', a_0$ — отнесенная к базисному значению (a_0) величина.

Список литературы

- 1-1. Стандарт СЭВ. СТ СЭВ 1052-78. Метрология. Единицы физических величин (см. также РД 50-160-79. Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052-78).
- 1-2. ГСССД 1-76. Фундаментальные физические константы. — М.: Изд-во стандартов, 1976.
- 1-3. ГОСТ 1494-77. Электротехника. Буквенные обозначения основных величин.
- 1-4. Бурдун Г. Д. Справочник по международной системе единиц. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 232 с.
- 1-5. Коэффициенты перевода единиц измерения физико-технических величин. — М.: Атомиздат, 1967. — 40 с.
- 1-6. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. — М.: Наука, 1977. — 335 с.
- 1-7. Чертов А. Г. Единицы физических величин. — М.: Высшая школа, 1977. — 287 с.
- 1-8. Соколов В. А. и Красавин А. М. Справочник мер. — М.: Внешторгиздат, 1956. — 226 с.
- 1-9. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева. — В кн.: БСЭ. т. 19. — М.: Советская энциклопедия, 1975, с. 413—417.

Раздел 2

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

СОДЕРЖАНИЕ

- | | | | |
|---|----|--|----|
| 2-1. Общие сведения и основные положения ЕСКД | 24 | 2-5. Правила графического оформления электрических схем | 37 |
| 2-2. Основные требования к оформлению чертежей | 26 | Классификация схем (37). Общие правила выполнения схем (37). Правила выполнения структурных и функциональных схем (38). Правила выполнения принципиальных схем (38). Правила выполнения схем соединений и схем подключения (41). Правила выполнения общих схем и схем расположения (42) | |
| 2-3. Оформление чертежей на стадии проектирования | 30 | 2-6. Условные графические обозначения, применяемые в схемах | 43 |
| 2-4. Общие правила выполнения конструкторской документации различных изделий | 33 | Обозначения общего применения (по ГОСТ 2.721-74) (43). Электрические машины (по ГОСТ 2.722-68) (43). Катушки индуктивности, реакторы, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители (по ГОСТ 2.723-68) (45). Токосъемники (по ГОСТ 2.726-68) (47). Разрядники. Предохранители (по ГОСТ 2.727-68) (47). Резисторы. Конденсаторы (по ГОСТ 2.728-74) (48). Электроизмерительные приборы (по ГОСТ 2.729-68) (51). | |
| Правила выполнения конструкторской документации изделий с применением электромонтажа (33). Правила выполнения чертежей для электромонтажа (33). Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и проводов (34). Чертежи изделий с электрическими обмотками и магнитопроводами (35). Изображение печатных плат (36) | | | |

Полупроводниковые приборы (по ГОСТ 2.730-73) (51). Источники света (по ГОСТ 2.732-68) (54). Химические источники тока (по ГОСТ 2.742-68) (55). Электротермические устройства и установки (по ГОСТ 2.745-68) (55). Род тока и напряжения, виды соединений обмоток, формы импульсов (по ГОСТ 2.750-68) (56). Линии электрической связи, провода, кабели и шины

(по ГОСТ 2.751-73) (57). Коммутационные устройства и контактные соединения (по ГОСТ 2.755-74) (58). Воспринимающая часть электромеханических устройств (по ГОСТ 2.756-76) (62). Двоничные логические элементы (по ГОСТ 2.743-72) (62). Вычислительные машины аналоговые и аналого-цифровые (по ГОСТ 23335-78) (68)

2-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЕСКД

Единая система конструкторской документации (ЕСКД)—комплекс государственных стандартов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, оформления конструкторской документации, создаваемой и применяемой организациями и предприятиями Советского Союза.

К конструкторским документам относятся графические и текстовые документы, которые в отдельности или в совокупности определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки или изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

Изделием называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

Виды изделий указаны в табл. 2-1.

Таблица 2-1

Вид изделия	Определение
Деталь	Изделие, изготовленное из однородного материала, без применения сборочных операций, например отрезок кабеля или провода заданной длины; трубка, спаянная или сваренная из одного куска листового материала; коробка, склеенная из одного куска материала
Сборочная единица	Изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями (свинчиванием, клепкой, сваркой, пайкой, спрессовкой, склеиванием и т. п.)
Комплекс	Два и более специфицированных (т. е. состоящих из двух и более составных частей) изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций
Комплект	Два и более изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих собой набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение, как правило, вспомогательного характера (комплект запасных частей, комплект измерительной аппаратуры и т. п.)

Таблица 2-2

Вид документа	Шифр документа	Определение
Чертежи детали	—	Документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля
Сборочный чертеж	СБ	Документ, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки (изготовления) и контроля. К СБ относят также гидро-, пневмо- и электромонтажные чертежи
Чертеж общего вида	ВО	Документ, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие ее основных составных частей и поясняющий принцип работы изделия
Теоретический чертеж	ТЧ	Документ, определяющий геометрическую форму (обводы) изделия и координаты расположения составных частей
Габаритный чертеж	ГЧ	Документ, содержащий контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами
Монтажный чертеж	МЧ	Документ, содержащий контурное изображение изделия, а также данные, необходимые для его установки (монтажа) на месте применения
Схема	По ГОСТ 2.701-76	Документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними

Графические конструкторские документы перечислены в табл. 2-2.

При определении комплектности конструкторских документов на изделие различают:

основной конструкторский документ, в отдельности или в совокупности с другими записанными в нем конструкторскими документами полностью и однозначно определяющий данное изделие и его состав. Для деталей — это чертеж детали; для сборочных единиц, комплексов и комплектов — спецификация;

основной комплект конструкторских документов изделия, объединяющий конструкторские документы, относящиеся ко всему изделию, например сборочный чертеж, принципиальная электрическая схема;

полный комплект конструкторских документов изделия, состоящий (в общем случае) из основного комплекта конструкторских документов на все его составные части, применяемые по своим основным конструкторским документам.

Спецификация — документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта и оформляемый в соответствии с ГОСТ 2.108-68.

В СССР с января 1979 г. применяется Единая система конструкторской документации Совета Экономической Взаимопомощи, определяемая стандартами СЭВ, введенными в действие в качестве государственных стандартов СССР.

Указания по графическому оформлению электротехнических чертежей и схем содержатся в следующих стандартах ЕСКД:

ГОСТ 2.101-68	Виды изделий
ГОСТ 2.102-68	Виды и комплектность конструкторских документов
ГОСТ 2.103-68	Стадии разработки
ГОСТ 2.104-68	Основные надписи
ГОСТ 2.105-68	Общие требования к текстовым документам
ГОСТ 2.106-68	Текстовые документы
ГОСТ 2.108-68	Спецификация
ГОСТ 2.109-73	Основные требования к чертежам
ГОСТ 2.114-70	Технические условия
	Правила построения, изложения и оформления
ГОСТ 2.118-73	Техническое предложение
ГОСТ 2.119-73	Эскизный проект
ГОСТ 2.120-73	Технический проект
ГОСТ 2.301-68	Форматы
ГОСТ 2.302-68	Масштабы
ГОСТ 2.303-68	Линии
ГОСТ 2.304-68	Шрифты чертежные
ГОСТ 2.305-68	Изображения — виды, разрезы, сечения
ГОСТ 2.306-68	Обозначения графические материалов и правила их нанесения на чертежах
ГОСТ 2.307-68	Нанесение размеров и предельных отклонений
ГОСТ 2.308-68	Указания на чертежах предельных отклонений формы и расположения поверхностей

ГОСТ 2.309-73	Обозначение шероховатости поверхности
ГОСТ 2.310-68	Нанесение на чертежах обозначений покрытий, термической и других видов обработки
ГОСТ 2.311-68	Изображение резьбы
ГОСТ 2.312-72	Условные изображения и обозначения швов сварных соединений
ГОСТ 2.313-68	Условные изображения и обозначения швов неразъемных соединений
ГОСТ 2.314-68	Указания на чертежах о маркировании и клеймении изделий
ГОСТ 2.315-68	Изображения упрощенные и условные крепежных деталей
ГОСТ 2.316-68	Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц
ГОСТ 2.317-69	Аксонметрические проекции
ГОСТ 2.401-68	Правила выполнения чертежей пружин
ГОСТ 2.410-68	Правила выполнения чертежей металлических конструкций
ГОСТ 2.413-72	Правила выполнения конструкторской документации изделий, изготовляемых с применением электрического монтажа
ГОСТ 2.414-75	Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и проводов
ГОСТ 2.415-68	Правила выполнения чертежей изделий с электрическими обмотками
ГОСТ 2.416-68	Условные изображения сердечников магнитопроводов
ГОСТ 2.417-78	Правила выполнения чертежей печатных плат
ГОСТ 2.701-76	Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению
ГОСТ 2.702-75	Правила выполнения электрических схем
ГОСТ 2.703-68	Правила выполнения кинематических схем
ГОСТ 2.704-68	Правила выполнения гидравлических и пневматических схем
ГОСТ 2.705-70	Правила выполнения электрических схем обмоток и изделий с обмотками
ГОСТ 2.707-72	Правила выполнения электрических схем железнодорожной сигнализации, централизации и блокировки
ГОСТ 2.708-72	Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники

- ГОСТ 2.709-72 Система маркировки цепей в электрических схемах (см. разд. 40)
- ГОСТ 2.721-74 — ГОСТ 2.756-76 Обозначения условные графические в электрических схемах (см. § 2-6).

Стандарты ЕСКД СЭВ

- СТ СЭВ 138-74 Условное изображение неразъемных соединений
- СТ СЭВ 140-74 Оформление чертежей листов
- СТ СЭВ 141-74 Обозначения условные графические в электрических схемах. Обозначения общего применения
- СТ СЭВ 158-75 Схемы электрические. Общие требования к выполнению
- СТ СЭВ 287-76 Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения
- СТ СЭВ 363-76 Изображения. Основные правила
- СТ СЭВ 364-76 Виды изделий
- СТ СЭВ 365-76 Основные надписи
- СТ СЭВ 527-77 Схемы электрические. Классификация. Термины и определения
- СТ СЭВ 649-77 Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и проводов
- СТ СЭВ 651-77 Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению
- СТ СЭВ 653-77 Обозначения условные графические в электрических схемах. Источники тока электрохимические и электротермические
- СТ СЭВ 655-77 Обозначения условные графические в электрических схемах. Машины вращающиеся электрические
- СТ СЭВ 656-77 Обозначения условные графические в электрических схемах. Установки электротермические промышленные
- СТ СЭВ 661-77 Обозначения условные графические в электрических схемах. Приборы полупроводниковые
- СТ СЭВ 712-77 Обозначения условные графические в электрических схемах. Воспринимающая часть электромеханических устройств
- СТ СЭВ 862-78 Обозначения условные графические в электрических схемах. Разрядники и предохранители

- СТ СЭВ 863-78 Обозначения условные графические в электрических схемах. Резисторы
- СТ СЭВ 864-78 Обозначения условные графические в электрических схемах. Конденсаторы
- СТ СЭВ 865-78 Обозначения условные графические в электрических схемах. Приборы электровакуумные
- СТ СЭВ 866-78 Обозначения условные графические в электрических схемах. Источники света
- СТ СЭВ 869-78 Обозначения условные графические в электрических схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы и магнитные усилители
- СТ СЭВ 1182-78 Основные правила выполнения чертежей
- СТ СЭВ 1184-78 Правила выполнения чертежей изделий с электрическими обмотками
- СТ СЭВ 1186-78 Правила выполнения чертежей печатных плат
- СТ СЭВ 1187-78 Схемы кинематические. Правила выполнения
- СТ СЭВ 1188-78 Схемы электрические. Правила выполнения

2-2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЧЕРТЕЖЕЙ

Форматы

Форматы листов КД определяются по ГОСТ 2.301-68 размерами внешней рамки, выполненной сплошной тонкой линией. В табл. 2-3 указаны размеры основных форматов, образованных последовательным делением формата А4 (1189×841) площадью 1 м² на две равные части.

Т а б л и ц а 2-3

Обозначение основного формата	А4	А3	А2	А1	А0
Размеры сторон формата	1189×841	594×841	594×420	297×420	297×210
Формат бумаги	А ₀	А ₁	А ₂	А ₃	А ₄

Допускается применение дополнительных форматов, образуемых увеличением сторон основных форматов на длину, кратную размерам формата А1 и определяемую целым числом. Обозначение форматов составляет из двух чисел, первое из кото-

рых указывает кратность стороны формата к 297 мм, а второе — кратность другой стороны формата к 210 мм.

Масштабы

Масштабы изображений на чертежах (кроме печатных изданий и фотографий) определяются наряду с натуральным масштабом (М1:1) следующим рядом (по ГОСТ 2.302-68):

Масштабы уменьшения: 1:2; 1:2,5; 1:4; 1:5; 1:10; 1:15; 1:20; 1:25; 1:40; 1:50; 1:75; 1:100; 1:200; 1:400; 1:500; 1:800; 1:1000.

Масштабы увеличения: 2:1; 2,5:1; 4:1; 5:1; 10:1; 20:1; 40:1; 50:1; 100:1.

Линии

Наименование, начертание, толщина линий на чертежах и их основное назначение установлены ГОСТ 2.303-68. Толщина сплошной основной линии s устанавливается в пределах 0,6—1,5 мм в зависимости от размера и сложности изображения, а также от формата чертежа.

Сплошная (основная) — линии видимого контура, линии перехода видимые, линии контура сечения.

Сплошная тонкая (от $s/3$ до $s/2$) — линии контура иаложеного сечения; линии размерные и выносные, линии штриховые, линии-выноски, полки линий-выносок и подчеркивание надписей, линии для изображения пограничных деталей.

Сплошная волнистая (от $s/3$ до $s/2$) — линии обрыва, линии разграничения вида и разреза.

Штриховая тонкая (от $s/3$ до $s/2$) — линии невидимого контура, линии перехода невидимые.

Штрихпунктирная (от $s/3$ до $s/2$) — линии осевые и центровые.

Штрихпунктирная толстая (от $s/3$ до $s/2$) — линии, изображающие элементы изделия, расположенные перед секущей плоскостью; поверхности, подлежащие термобработке или покрытию.

Штрихпунктирная тонкая с двумя точками (от $s/3$ до $s/2$) — линии для изображения частей изделий в различных положениях.

Разомкнутая толстая (от s до 1,5 s) — линии сечений.

Сплошная тонкая с изломами (от $s/3$ до $s/2$) — длинные линии обрыва.

Основные надписи

Формы, размеры, порядок заполнения основных надписей в КД предусмотрены ГОСТ 2.104-68. Внутренняя рамка формата выполняется сплошной линией на расстоянии 5 мм от внешней рамки с трех сторон и с оставлением 20 мм поля с левой стороны формата.

Основные надписи определяются СТ СЭВ 365-76.

Основные надписи располагают в правом нижнем углу листа. На листах формата 11 основные надписи располагают вдоль короткой стороны листа. Общие размеры основной надписи для чертежа и схем: высота 11×5 мм=55 мм, длина — 185 мм.

Шрифты

Чертежные шрифты для надписей, наносимых от руки на чертежи и другие КД, определены ГОСТ 2.304-68. Наклон букв и цифр к основанию строки должен быть около 75°. Наименования, заголовки, обозначения в основной надписи и на поле чертежа допускается писать без наклона (кроме букв греческого алфавита).

Размер шрифта определяется высотой прописных букв в миллиметрах. Установлен следующий ряд размеров шрифта: 2,5; 3,5; 5; 7; 10; 14; 20; 28; 40. Различают основный и широкий шрифты. Высота букв и цифр на чертежах, выполненных тушью, должна быть не менее 2,5 мм, а на чертежах, выполненных в карандаше, не менее 3,5 мм.

Изображение изделий

Изображение изделий на чертежах определяется СТ СЭВ 362-76 и СТ СЭВ 363-76.

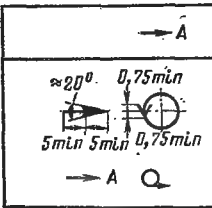
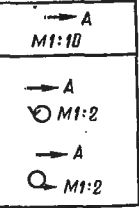
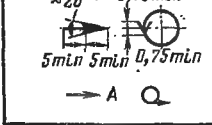
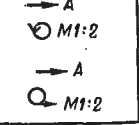
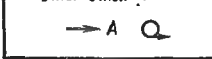
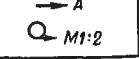
Изображение изделия, как правило, выполняется в масштабе ортогональным параллельным проектированием его геометрической модели на плоскость чертежа при соблюдении основных правил упрощения. Изображение должно определять форму изделия, взаимосвязь его составных частей (элементов конструкции). Количество изображений (видов, разрезов, сечений) должно быть минимальным, необходимым для полного и однозначного представления об изделии.

Вид — изображение, обращенной к направлению проектирования видимой части поверхности предмета. Видимые контуры и грани изделия изображаются сплошными линиями. Невидимые контуры и грани выполняются тонкой штриховой линией только в тех случаях, когда это необходимо для пояснения изображаемого предмета или для ограничения числа необходимых изображений.

Изделия из прозрачных материалов изображаются как непрозрачные. Крайние положения подвижных частей на чертеже изображаются тонкой штрихпунктирной линией с двумя точками. Соседние предметы, изображаемые для пояснения, вычерчиваются в виде контура тонкой штрихпунктирной линией с двумя точками. Допускается вычерчивать соседние детали в виде контура тонкой сплошной линией.

Виды на чертеже должны быть отмечены в соответствии с табл. 2-4. На основном виде (или на другом изображении) необхо-

Таблица 2-4

Наименование изображения	Способ обозначения	
	Масштаб изображения одинаковый	Масштабы изображения разные
Вид		
Вид повернутый		
Вид развернутый		

можно обозначить соответствующее направление проектирования (рис. 2-1).

Дополнительный вид располагают в направлении дополнительного проектирования, указываемого стрелкой. Если дополнительный

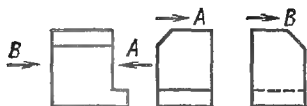


Рис. 2-1. Обозначения направления проектирования.

вид смещен или повернут относительно вида, то его необходимо обозначить буквой или графическим обозначением в соответствии с табл. 2-4 и рис. 2-2.

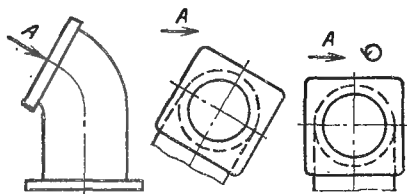


Рис. 2-2. Обозначения дополнительных видов.

Развернутые виды применяются для изображения искривленных и гнутых предметов, которые развертываются в плоскость без искажения. При таком изображении контур выполняют сплошной линией, а место сгиба — тонкой штрихпунктирной линией с двумя точками.

Разрезы — изображение геометрической модели изделия, рассеченной одной или несколькими секущими плоскостями. На разрезе изображается то, что получается в секущих плоскостях и что расположено за ними в направлении проектирования (рис. 2-3).

Части изделия, находящиеся за секущей плоскостью (или над секущей плоскостью разреза), не должны вычерчиваться полностью в тех случаях, если они не влияют на ясность изображения изделия (пояснение конструкции и т. д.).

Если секущая плоскость направлена вдоль оси или длинной стороны таких частей изделия, как стержни, стрелы и т. п., то они изображаются нерассеченными, а ребра не штрихуются.

Сечение — изображение, получающееся при рассечении геометрической модели изделия секущей плоскостью. В сечении изображается только то, что получается непо-

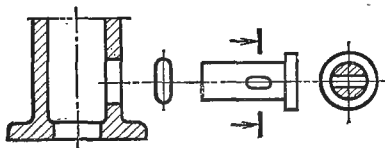


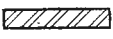
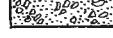
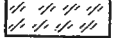
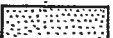
Рис. 2-3. Обозначения разрезов.

средственно в секущей плоскости. Если сечение получается состоящим из отдельных самостоятельных частей, то следует выполнять разрез. Допускается поворачивание сечения при его построении.

Положение секущих плоскостей разреза и сечения обозначается толстой разомкнутой линией. При сложном разрезе штрихи проводят также у перегибов соответствующих линий сечения. Начальный и конечный штрихи не должны пересекать контур изображения. При необходимости эти штрихи могут быть расположены внутри контура изображения. На начальном и конечном штрихах на расстоянии 2—3 мм от их концов следует ставить стрелки, указывающие направление проектирования.

Разрез обозначают одной и той же прописной буквой алфавита или буквами в сочетании с цифрами (например, А1—А1). Буквы наносят непосредственно около стрелок.

Таблица 2-5

Материал	Обозначение
Металлы и твердые сплавы	
Неметаллические материалы, в том числе волокнистые, монолитные и плитные (прессованные), за исключением указанных ниже	
Древесина:	
а) поперек волокна	
б) вдоль волокна	
Фанера	
Ксилолит, плиты древесностружечные, древесноволокнистые, столярные и т. д.	
Волокнистые немонолитные материалы (вата, стекловата, войлок, мипора и т. п.)	
Бетон армированный	
Бетон неармированный	
Кладка из кирпича строительного и специального клинкера, керамики, терракоты, искусственного и естественного камня любой формы и т. п.	
Стекло и другие прозрачные материалы	
Жидкости	
Грунт	
Глина (в качестве конструктивного материала)	
Песок, асбестоцемент, гипсовые изделия, лепнина, замазка, штукатурка, раствор, абразив и т. п.	
Сетка	
Засыпка из любого материала	

Штриховка сечений различных материалов представлена в табл. 2-5.

Правила условного изображения резьбовых поверхностей на чертежах определены ГОСТ 2.311-68.

Резьбу изображают:

а) на стержне — сплошными основными линиями по наружному диаметру резьбы и сплошными тонкими линиями — по внутреннему диаметру согласно рис. 2-4.

б) в отверстиях — сплошными основными линиями по внутреннему диаметру и сплошными тонкими линиями по наружному диаметру согласно рис. 2-5.

Сплошную тонкую линию при изображении резьбы наносят на расстоянии не менее 0,8 мм от основной линии и не более шага резьбы. Резьбу, показываемую как невидимую, изображают штриховыми линиями одной толщины по наружному и внутреннему диаметрам.

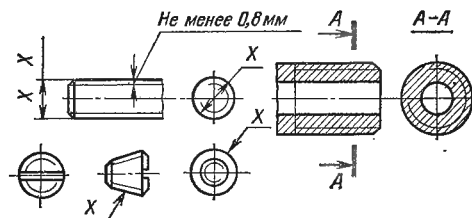


Рис. 2-4. Обозначение резьбы на стержне.

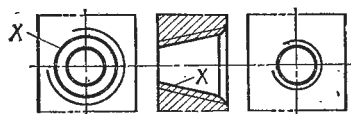


Рис. 2-5. Обозначение резьбы в отверстиях.

Штриховку в разрезах и сечениях проводят до сплошной основной линии.

На разрезах резьбового соединения при проектировании изделия параллельно его оси в отверстиях показывают только ту часть резьбы, которая не закрыта резьбой стержня.

Нанесение размеров и надписей

Основанием для определения размеров изображаемого изделия и его элементов, как правило, служат размерные числа, нанесенные на чертеже. Основанием для определения требуемой точности изделия при изготовлении являются указанные на чертеже предельные отклонения размеров, а также отклонения формы и расположения поверхностей.

Общее количество размерных надписей на чертеже должно быть минимальным, но достаточным для изготовления и контроля изделия. Размеры, не подлежащие выполнению по данному чертежу, а также указываемые для большего удобства чтения чертежа, называются справочными и отмечаются знаком *. Не допускается повторять размеры одного и того же элемента на разных изображениях, в технических требованиях, основной надписи и спецификации.

Линейные размеры и предельные отклонения линейных размеров на чертежах указывают в миллиметрах, без обозначения единицы. Условные размеры и предельные отклонения угловых размеров указывают в градусах, минутах и секундах с обозначением

нием единицы. Для размерных чисел применяются простые дроби не допускается (кроме размеров в дюймах).

Размеры, определяющие расположение сопрягаемых поверхностей, проставляют, как правило, от конструктивных баз с уче-

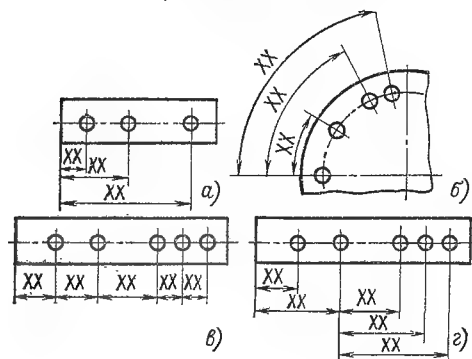


Рис. 2-6. Способы простановки размеров.

том возможностей выполнения и контроля этих размеров. При расположении элементов предмета на одной оси размеры, их определяющие, наносят от общей базы (поверхности, оси) по рис. 2-6, а и б (так называемый координатный способ), заданием размеров между смежными элементами по рис. 2-4, в (так называемый цепной способ), заданием размеров нескольких групп элементов от нескольких общих баз по рис. 2-4, г (так называемый комбинированный способ).

Размеры на чертежах указывают размерными числами, размерными и выносными линиями.

Расстояние между параллельными размерными линиями, а также расстояние между размерной линией и определяемым ею прямолинейным отрезком должно быть в пределах 6—10 мм.

Размерные числа наносят над размерной линией возможно ближе к ее середине. Размерные числа и предельные отклонения не допускается разделять и пересекать какими бы то ни было линиями. Не допускается разрывать линию контура для нанесения размерного числа и наносить размерные числа в местах пересечения размерных, осевых и центровых линий. В местах нанесения размерного числа осевые, центровые линии и линии штриховки прерываются.

Размеры нескольких одинаковых элементов изделия, как правило, наносят один раз с указанием на полке линии-выноски количества этих элементов.

Правила нанесения размеров определяются ГОСТ 2.307-68.

Кроме изображения изделия с размерами и предельными отклонениями чертеж может содержать:

текстовую часть, состоящую из технических требований и (или) технических характеристик;

надписи с обозначениями изображений, а также относящиеся к отдельным элементам изделия;

таблицы с размерами и другими параметрами, условными обозначениями и т. д.

Текстовую часть, надписи и таблицы включают в чертеж в тех случаях, когда содержащиеся в них данные, указания и разъяснения невозможно и нецелесообразно выразить графически или условными обозначениями. В надписях на чертежах не должно быть сокращений слов, за исключением общепринятых, а также установленных в стандартах и приложении к ГОСТ 2.316-68.

2.3. ОФОРМЛЕНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Стадии разработки

Документы в зависимости от стадии разработки подразделяются на проектные (техническое предложение, эскизный проект и технический проект) и рабочие (рабочая документация).

Различные стадии разработки документации связаны (по ГОСТ 2.103-68) с этапами выполнения работ.

Техническое задание: разработка, согласование и утверждение технического задания.

Техническое предложение (ГОСТ 2.118-73) подбор материалов; разработка технического предложения по результатам анализа технического задания с присвоением документам литеры П; рассмотрение и утверждение технического предложения.

Эскизный проект (ГОСТ 2.119-73): разработка эскизного проекта с присвоением документам литеры Э; изготовление и испытание макетов; рассмотрение и утверждение эскизного проекта.

Технический проект ГОСТ (2.120-73): разработка технического проекта с присвоением документам литеры Т, изготовление и испытание макетов, рассмотрение и утверждение технического проекта.

Разработка рабочей документации: а) опытного образца (опытной партии): разработка конструкторских документов, предназначенных для изготовления и испытания опытного образца (партии), изготовление и заводские испытания опытного образца (партии); корректировка конструкторских документов по результатам изготовления и заводских испытаний с присвоением литеры О, государственные, межведомственные, приемочные и другие испытания опытного образца (партии); корректировка конструкторских документов с присвоением литеры О₁, О₂ и т. д.;

б) установочных серий: изготовление и испытание установочной серии; корректировка конструкторских документов по результатам изготовления, испытания и оснащения технологического процесса ведущих составных частей изделия установочной серии с присвоением литеры А;

в) установившегося серийного или массового производства: изготовление и испытание головной (контрольной) серии; корректировка конструкторских документов с присвоением литеры Б конструкторским документам, окончательно отработанным и проведенным в производстве изготовлением изделий по зафиксированному и полностью оснащенному технологическому процессу.

Технический проект

Технический проект — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия и исходные данные для разработки рабочей документации.

Чертеж общего вида в общем случае должен содержать:

а) изображение изделия (виды, разрезы, сечения), текстовую часть и надписи, необходимые для понимания конструктивного устройства изделия, взаимодействия его составных частей и принципа работы;

б) наименования, а также обозначения (если они имеются) тех составных частей изделия, для которых необходимо указать данные (технические характеристики, количество, указания о материале, принципе работы и др.) или запись которых необходима для пояснения изображения чертежа общего вида: описания принципа работы изделия, указания о составе и др.;

в) размеры и другие наносимые на изображение при необходимости данные;

г) схему, если она требуется (можно не на отдельном листе);

д) техническую характеристику изделия, если это необходимо, для удобства сопоставления вариантов по чертежу общего вида.

Изображения выполняют с максимальными упрощениями, предусмотренными ЕСКД для рабочих чертежей. Составные части изделия, в том числе заимствованные (ранее разработанные), изображают с упрощениями (иногда в виде контурных очертаний), если при этом обеспечено понимание конструктивного устройства разрабатываемого изделия, взаимодействия его составных частей и принципа работы.

Отдельные изображения составных частей изделия размещают на одном листе с изображениями всего изделия или на отдельных листах чертежа общего вида. Наименование и обозначение составных частей изделия на чертежах общего вида указывают на полках линий-выносок, в таблице, размещаемой на том же месте, что и изображение изделия, в таблице, выполненной на отдельных листах формата А1 по ГОСТ 2.301-68, в качестве последующих листов чертежа общего вида. При наличии таблицы на полках линий-выносок указывают номера позиций составных частей, включаемых в таблицу. Таблица в общем

случае состоит из граф: «Поз.», «Обозначение», «Кол.», «Дополнительные указания».

На чертеже общего вида технического проекта при необходимости приводятся указания о выбранных посадках деталей (наносятся размеры и предельные отклонения сопрягаемых поверхностей по ГОСТ 2.301-68); технические требования к изделию, например о применении определенных покрытий, способов пропитки обмоток, методов сварки; технические характеристики изделия, которые необходимы для последующей разработки рабочих чертежей.

Рабочая документация

Основные требования к выполнению чертежей деталей (сборочных, габаритных и монтажных) на стадии разработки рабочей документации для всех отраслей промышленности установлены ГОСТ 2.109-73.

Рабочие чертежи разрабатывают, как правило, на все детали, входящие в состав изделия. Допускается не выпускать чертежи на:

а) детали, изготавливаемые из фасонного или сортового материала отрезкой под прямым углом, из листового материала отрезкой по окружности или по периметру прямоугольника без последующей обработки;

б) детали больших размеров и сложной конфигурации, соединенные запрессовкой, пайкой, сваркой или другими подобными способами с менее сложными деталями;

в) детали, изготавливаемые как сборочные единицы наплавкой металла или сплава, заливкой поверхностей или элементов детали металлом, сплавом, пластмассой, резиной и другими материалами;

г) детали изделий с неразъемными соединениями (сварных, паяных, клепаных, склеенных, сбитых гвоздями и т. д.), являющихся составными частями изделий индивидуального производства, если конструкция таких деталей проста (для их изготовления достаточно трех-четырех размеров на сборочном чертеже или одного изображения на свободном поле чертежа);

д) детали изделий индивидуального производства, форма и размеры которых устанавливаются по месту;

е) покупные детали, подвергаемые антикоррозионному или декоративному покрытию, не изменяющему характер сопряжения со смежными деталями.

Необходимые для изготовления и контроля этих деталей данные указывают на сборочных чертежах или спецификациях.

Сборочные чертежи выполняют, как правило, с упрощениями, соответствующими требованиям ЕСКД. Сборочный чертеж должен содержать:

а) изображение сборочной единицы, дающее представление о расположении и взаимной связи составных частей, соединяемых по данному чертежу, и обеспечивающее возможность осуществления сборки и контроля сборочной единицы; допускается по-

мещать на сборочных чертежах дополнительные схематические изображения соединения и расположения составных частей изделия;

б) размеры, предельные отклонения и другие параметры и требования, которые должны быть выполнены или проконтролированы по данному сборочному чертежу;

в) указания о характере сопряжения и методах его осуществления, если точность сопряжения обеспечивается подбором, пригонкой;

г) номера позиций составных частей, входящих в изделие;

д) габаритные размеры изделия;

е) установочные, присоединительные размеры и другие необходимые справочные данные;

ж) техническую характеристику изделия (при необходимости);

з) координаты центра масс (при необходимости).

На сборочном чертеже допускается:

а) изображать перемещающиеся части изделия в крайнем или промежуточном положении с соответствующими размерами;

б) помещать упрощенное изображение граничных (соседних) изделий («обстановки») и размеры, определяющие их взаимное расположение. Составные части изделия, расположенные за обстановкой, изображают как видимые.

На сборочных чертежах допускается не показывать:

а) фаски, скругления, проточки, углубления, выступы, накатки, насечки, оплетки и другие мелкие элементы;

б) зазоры между стержнем и отверстием;

в) крышки, щиты, кожуха, перегородки и т. п., если необходимо показать закрытые или составные части изделия. При этом под изображением делают соответствующую надпись, например «Крышка поз. 3 не показана»;

г) видимые составные части изделий или их элементы, расположенные за сеткой, а также частично закрытые впереди расположенными составными частями;

д) надписи на табличках, фирменных планках, шкалах и других подобных деталях (изображается только их контур).

Изделия из прозрачного материала изображают как непрозрачные, но допускается составные части изделий и их элементы, расположенные за прозрачными предметами, изображать как видимые.

На сборочных чертежах на разрезах изображают нерассеченными составные части, на которые оформлены самостоятельные сборочные чертежи, а типовые, покупные и другие широко применяемые изделия изображают упрощенными внешними очертаниями. Сварное, паяное, клееное и тому подобное изделие из однородного материала в сборе с другими изделиями в разрезах и сечениях штрихуют в одну сторону, обозначая границы между деталями изделия сплошными основными линиями либо

изображая конструкцию как монолитное тело.

Габаритные чертежи не предназначены для изготовления по ним изделий и не должны содержать данных для изготовления и сборки. Изображения изделия на габаритных чертежах выполняют с максимальными упрощениями сплошными основными линиями, а очертания перемещающихся частей в крайних положениях — штрихпунктирными тонкими линиями.

Монтажный чертеж должен содержать: изображение монтируемого изделия, выполненное упрощенно (внешними очертаниями);

упрощенные изображения изделий, применяемых при монтаже, а также полное или частичное изображение устройства, к которому изделие крепится;

установочные и присоединительные размеры с предельными отклонениями;

перечень составных частей, необходимых для монтажа;

технические требования к монтажу изделия.

Изображение монтируемого изделия выполняют сплошными основными линиями, а устройством, к которому крепится изделие, — сплошными тонкими линиями.

Спецификация определяет состав сборочной единицы, комплекса и комплекта и необходима для комплектования конструкторских документов и изготовления изделий. Спецификацию оформляют на отдельных листах в соответствии с требованиями ГОСТ 2.108-68.

Спецификация состоит из разделов, которые располагаются в следующей последовательности: документация; комплексы; сборочные единицы; детали; стандартные изделия; прочие изделия; материалы; комплекты.

В раздел «Документация» вносят документы, составляющие основной комплект конструкторских документов.

В разделы «Комплексы», «Сборочные единицы» и «Детали» вносят комплексы, сборочные единицы и детали, непосредственно входящие в специфицируемое изделие. Запись изделий производят в алфавитном порядке буквенных и в возрастающем порядке цифровых обозначений индексов организаций-разработчиков.

В раздел «Стандартные изделия» записывают изделия, примененные по государственным, республиканским, отраслевым стандартам и стандартам предприятий.

В раздел «Прочие изделия» вносят изделия, примененные не по основным конструкторским документам (по техническим условиям, каталогам, прейскурантам и т. п.).

В раздел «Материалы» вносят все материалы, непосредственно входящие в специфицируемое изделие.

В раздел «Комплекты» вносят ведомость эксплуатационных документов и комплекты, которые непосредственно входят в специфицируемое изделие.

2-4. ОБЩИЕ ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Правила выполнения конструкторской документации изделий с применением электромонтажа

Конструкторскую документацию изделия с электромонтажом выполняют в одном из четырех вариантов:

для изготовления изделия, механическую сборку и электромонтаж которого целесообразно производить по одному и тому же чертежу, выпускают сборочный чертеж в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109-73 и ГОСТ 2.413-72 и спецификацию в соответствии с требованиями ГОСТ 2.108-68 и ГОСТ 2.413-72;

для изготовления изделия, механическую сборку и электромонтаж которого производить по одному и тому же чертежу нецелесообразно, из состава изделия с электромонтажом выделяют в виде самостоятельной сборочной единицы изделие механической сборки или совокупность составных частей, устанавливаемых при электромонтаже.

На изделие механической сборки выпускают сборочный чертеж в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109-73 и спецификацию в соответствии с требованиями ГОСТ 2.108-68. На изделие с электромонтажом выпускают сборочный чертеж в соответствии с требованиями ГОСТ 2.413-72 и спецификацию в соответствии с требованиями ГОСТ 2.108-68 и ГОСТ 2.413-72;

для изготовления изделия, механическую сборку и электромонтаж которого производить по одному и тому же чертежу нецелесообразно, а чертеж для электромонтажа выполнять как сборочный нерационально, выпускают для механической сборки — сборочный чертеж в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109-73 и спецификацию в соответствии с требованиями ГОСТ 2.108-68; для электромонтажа — электромонтажный чертеж в соответствии с требованиями ГОСТ 2.413-72, электромонтажному чертежу присваивают обозначение с шифром МЭ. Составные части, устанавливаемые по электромонтажному чертежу, вносят в спецификацию монтируемого изделия в дополнительных разделах;

для изготовления изделий, механическую сборку и электромонтаж которого производить по одному и тому же чертежу нецелесообразно и выпуск чертежа для электромонтажа затруднителен или нерационален, выпускают сборочный чертеж для механической сборки в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109-73; в технических требованиях чертежа приводят ссылку на документ, которым следует руководствоваться при электромонтаже.

Правила выполнения чертежей для электромонтажа

Чертеж для электромонтажа рекомендуется выполнять в том же масштабе, что и чертеж для механической сборки. При выполнении чертежа допускается применять аксонометрические проекции по ГОСТ 2.317-69.

На чертеже для электромонтажа изображают:

составные части, устанавливаемые при электромонтаже, и места присоединения проводников — сплошными основными линиями;

составные части, устанавливаемые до электромонтажа («обстановку»), — упрощенно и сплошными тонкими линиями.

Если составная часть является элементом электрической принципиальной схемы изделия, то на ее изображении или около него наносят позиционное обозначение, присвоенное этому элементу в схеме (рис. 2-7). Элементам, не указанным в электрической принципиальной схеме или схеме соединений, не участвующим в электрических соединениях (например, переходным стойкам, лепесткам заземления и т. п.), для указания адресов присоединения проводников присваивают очередные позиционные обозначения после элементов того же функционального назначения, изображенных на схеме.

Допускается смещать изображения составных частей. При этом от смещенного

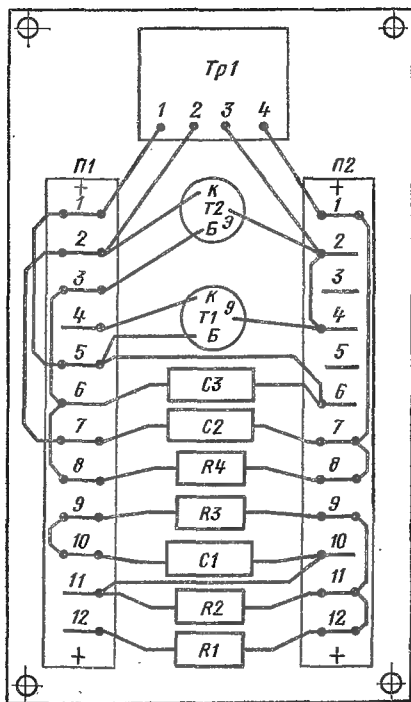


Рис. 2-7. Обозначение элементов на чертеже для электромонтажа.

изображения проводят линию-выноску, на полке которой наносят надпись «Смещено». Допускается условно изменять (укорачивать, удлинять и т. п.) очертания составных частей, если их изображения закрывают друг друга (рис. 2-8). При этом искажения очертаний не должны нарушать ясность чертежа.

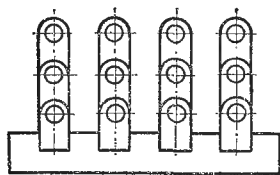


Рис. 2-8. Условное изображение составных частей изделия.

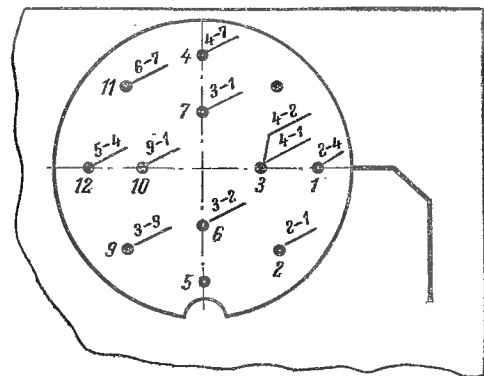


Рис. 2-9. Присоединение проводников к многоконтактному изделию.

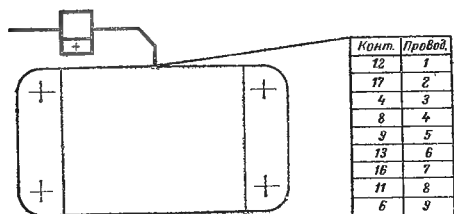


Рис. 2-10. Обозначение присоединения к контактам в таблице.

Проводник (провод, кабель, жгут, шину) изображают в соответствии с требованиями ГОСТ 2.414-75. При условном изображении проводников допускается слияние линий, изображающих одиночные провода, идущие рядом в одну линию, а также слияние линий, изображающих группу одиночных проводов, с другими линиями, изображающими одиночные провода и группы проводов. Не допускается слияние линий, изображающих жгут или кабель, с линиями, изображающими другие жгуты и кабели.

Условные изображения проводников, их изгибы в местах разветвления и слияния должны соответствовать ГОСТ 2.751-73.

Указания о присоединении проводников к многоконтактному изделию можно приводить непосредственно на чертеже (рис. 2-9) или помещать в таблице (рис. 2-10). Электрическое соединение, осуществляемое пайкой или сваркой, изображают точкой диаметром от 1,5 s до 3 s , где s — толщина сплошной основной линии, принятая на чертеже.

На чертеже для электромонтажа все проводники должны иметь обозначения, присвоенные им в электрической схеме соединений или электрической принципиальной схеме. При отсутствии обозначений в этих схемах проводникам присваивают самостоятельные обозначения. Допускается не присваивать обозначения перемычкам и одиночным проводам, изображения которых отчетливо просматриваются на чертеже.

Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и проводов

Чертежом жгута является сборочный чертеж специфицируемого изделия, состоящего из двух и более изолированных проводников, соединенных в пучок сплетением, связыванием, и других составных частей (соединительных устройств, наконечников и т. д.).

Чертежом кабеля является сборочный чертеж, если изделие состоит из кабеля или провода в виде детали и каких-либо других составных частей (соединительных устройств, наконечников и т. д.).

Выполняют чертежи жгутов в соответствии с требованиями ЕСКД к чертежам деталей и сборочным чертежам и требованиями ГОСТ 2.414-75. На чертежах жгутов, кабелей и проводов отдельные проводники следует показывать упрощенно (рис. 2-11), т. е. внешними очертаниями или условно, т. е. одной линией (рис. 2-12). На чертеже жгута или кабеля должны быть нанесены все размеры, необходимые для изготовления изделия. Если чертеж жгута выполнен в масштабе 1:1, то на нем указывают только размеры участков, изображенных с разрывом. Жгут, который в собранном изделии должен располагаться в разных плоскостях, следует изображать развернутым в плоскости чертежа. На чертеже жгута или кабеля каждый проводник должен иметь обозначение, присвоенное ему на чертеже для электромонтажа или электрической схеме.

На изображениях соединительных устройств или около них должны быть нанесены обозначения, присвоенные этим устройствам на электрической принципиальной схеме изделия или на схеме соединений. Взамен изображения мест присоединения проводников (проводов жгута или жил кабеля) указания о присоединении могут быть приведены на чертеже одним из следующих способов: в таблице (см. рис. 2-10); в технических требованиях чертежа; в виде схематического изображения на поле чертежа.

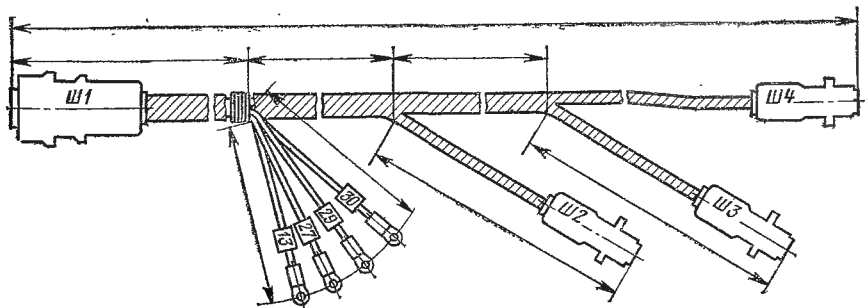


Рис. 2-11. Упрощенное изображение жгута.

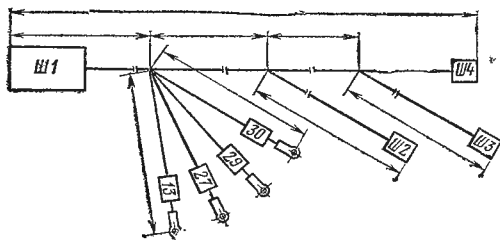


Рис. 2-12. Условное изображение жгута.

Чертежи изделий с электрическими обмотками и магнитопроводами

На чертежах якорей, статоров и индукторов электрических машин в продольном разрезе, как правило, изображают верхнюю половину предмета; при необходимости изобразить и нижнюю половину дают только его контур.

Электрические обмотки на чертежах якорей (роторов) и статоров в продольном и поперечном разрезах изображают так, как показано в табл. 2-6 (ГОСТ 2415-68).

При разрезе катушки вдоль проводов обмотки изображают, как показано на рис. 2-13.

Указания о количестве слоев и витков обмотки, изоляции бандажа, а также данные об их расположении помещают в тех-

нических требованиях или на линиях-выносах.

На сборочных чертежах изделий с обмотками помещают:

- схему обмотки;
- таблицу обмоточных данных, в которой указывают: число витков, номера выводов, сопротивление обмоток и т. д.;

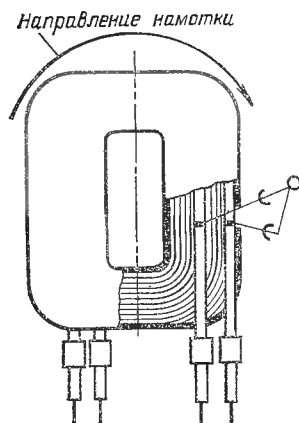


Рис. 2-13. Изображение обмотки в продольном разрезе.

Таблица 2-6

Вид обмотки	Изображение	Вид обмотки	Изображение
Двухвитковая		Одновитковая	
		Стержневая	

в) данные о пропитке, пайке и лакокрасочном покрытии, указываемые в технических требованиях чертежа.

Изображение шихтованных и витых магнитопроводов и сердечников в поперечных разрезах и сечениях (относительно листов или лент) показано на рис. 2-14 (ГОСТ 2.416-68). Направление линий штриховки должно соответствовать расположению листов или витков лент. Магнитопроводы в

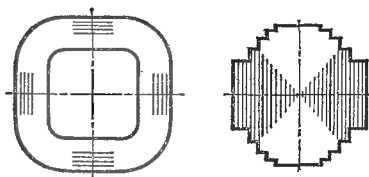


Рис. 2-14. Изображение разрезом и сечений магнитопроводов.

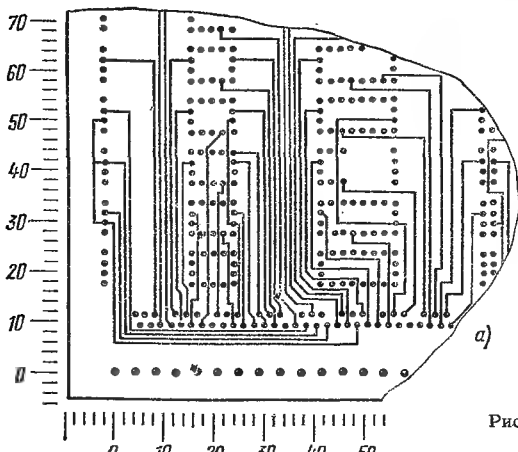
разрезах и сечениях вдоль листов не штрихуются. Если секущая плоскость проходит через ось магнитопровода ротора, статора и не совпадает с зубцом, то он условно совмещается с плоскостью разреза и показывается разрезанным. Магнитопроводы в видах показываются как монолитное тело.

Изображение печатных плат

Чертежи печатных плат (ГОСТ 2.417-78) следует выполнять линиями, толщина которых должна удовлетворять требованиям микрофильмирования и определяться способом выполнения чертежа и конструкцией печатной платы, при этом допускаются отклонения от ГОСТ 2.303-68.

Размеры печатных проводников, контактных площадок, монтажных отверстий и т. п. на чертеже печатных плат указывают:

а) в соответствии с требованиями ГОСТ 2.307-68 с помощью размерных и выносных линий;



б) нанесением координатной сетки в прямоугольной системе координат (рис. 2-15);

в) нанесением координатной сетки в полярной системе координат (рис. 2-16);

г) комбинированным способом, при помощи размерных и выносных линий и координатной сетки в прямоугольной или полярной системе координат.

При задании размеров нанесением координатной сетки линии сетки должны нумероваться. Координатную сетку в зависимости от способа выполнения документации следует наносить либо на все поле чертежа, либо на изображаемую поверхность печатной платы (рис. 2-15, б), либо рисками по периметру контура печатной платы (рис. 2-15, а).

Шаг прямоугольной координатной сетки — по ГОСТ 10317-72. Шаг координатной сетки в полярной системе координат задается по углу и диаметру и назначают в зависимости от расположения закономерного повторяющихся печатных элементов.

За нуль в прямоугольной системе координат на главном виде печатной платы следует принимать:

- центр крайнего левого нижнего отверстия платы;
- левый нижний угол платы;
- левую нижнюю точку, образованную линиями построения.

Участки плат, которые не допускаются занимать проводниками, на чертеже обозначают штрихпунктирной утолщенной линией.

Для простановки размеров, обозначений шероховатости поверхности, маркировки и т. п. допускается приводить на чертеже дополнительный вид, на котором рисунок печатной платы следует изображать частично. Над таким видом следует помещать надпись типа «Вид без проводников».

Круглые отверстия, имеющие зенковку, и круглые контактные площадки с круглыми отверстиями (в том числе и с зенковкой) следует изображать одной окружностью.

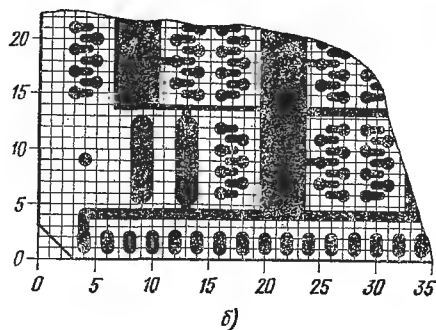


Рис. 2-15. Нанесение координатной сетки в прямоугольной системе координат.

а — рисками; б — на все поле чертежа.

Их форму и размеры следует определять на поле чертежа.

Проводники на чертеже должны изображаться двумя линиями. Отдельные элементы рисунка печатной платы (проводники, экраны, изоляционные участки и т. п.)

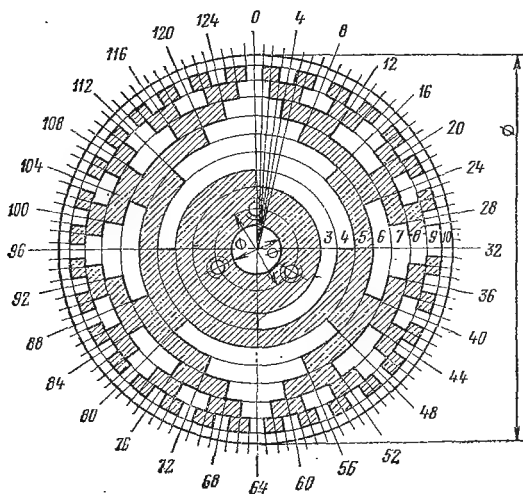


Рис. 2-16. Нанесение сетки в полярной системе координат.

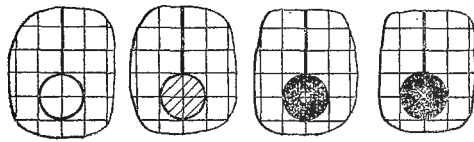


Рис. 2-17. Выделение элементов рисунка печатной платы.

допускается выделять на чертеже штриховкой, зачернением, растриванием и т. п. (рис. 2-17).

При необходимости указания способа изготовления печатной платы его следует записывать первым пунктом технических требований чертежа. Остальные технические требования следует группировать и записывать в последовательности, указанной в ГОСТ 2.316-68.

2-5. ПРАВИЛА ГРАФИЧЕСКОГО ОФОРМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

Классификация схем

ГОСТ 2.701-76 устанавливает виды и типы схем изделий всех отраслей промышленности и общие правила их выполнения. Стандарт соответствует СТ СЭВ 158-74 в части, касающейся общих требований к выполнению.

Схемы в зависимости от видов элементов и связей, входящих в состав изделия,

подразделяют на виды. Каждому виду схемы присваивают шифр, состоящий из букв русского алфавита. Электрическая схема обозначается буквой Э.

Схемы в зависимости от основного назначения подразделяются на типы. В табл. 2-7 представлены классификации схем по типу.

Таблица 2-7

Тип схемы	Шифр схемы	
	ГОСТ 2.701-76	СТ СЭВ 527-77
Структурная	1	101
Функциональная	2	102
Принципиальная (полная)	3	201
Эквивалентная	—	202
Соединений (монтажная)	4	301
Общая	6	302
Подключения	5	303
Расположения	7	401
Прочие	8	—
Объединенная	0	—
Электрооборудования и проводки	—	402
Электроснабжения и связи	—	403

Примечание. Номенклатура схем прочих типов должна быть установлена в отраслевых нормативно-технических документах.

Наименование схемы определяется ее видом и типом. Например, схема электрическая принципиальная ЭЗ, схема электрическая соединений Э4 и т. д. Допускается совмещать схемы следующих типов: принципиальную и соединений, соединений и подключения. Совмещенной схеме присваивают наименование схемы, тип которой имеет наименьший порядковый номер.

На изделие допускается выполнять схему определенного вида и типа на нескольких листах или вместо одной схемы определенного вида и типа выполнять совокупность схем того же вида и типа. При этом каждая схема должна быть оформлена как самостоятельный документ. В этом случае, начиная со второй схемы, к шифру схемы добавляют порядковый номер, например АБВГ. XXXXXX.256ЭЗ, АБВГД. XXXXXX.256ЭЗ.1, АБВГД. XXXXXX.256ЭЗ.2.

Общие правила выполнения схем

Количество типов схем на изделие выбирается минимальным, но в совокупности они должны содержать сведения в объеме, достаточном для проектирования, изготовления, эксплуатации, ремонта и контроля изделия.

Форматы листов выбираются в соответствии с требованиями, установленными в ГОСТ 2.301-68 (см. § 2-2). При выборе форматов следует учитывать условия эксплуатации схем, возможность обработки схем средствами электронной вычислительной техники. Схемы выполняются без соблюдения мас-

штаба, действительное пространственное расположение составных частей изделия не учитывают или учитывают приближенно.

Графическое обозначение элементов и соединяющие их линии связи следует располагать таким образом, чтобы обеспечить наилучшее представление о структуре изделия и взаимодействии его составных частей. Линии связи должны иметь наименьшее количество изломов и взаимных пересечений. Расстояние между соседними параллельными линиями связи должно быть не менее 3 мм.

Правила выполнения структурных и функциональных схем

Структурная схема определяет основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи. Структурные схемы разрабатывают на стадиях проектирования изделий, предшествующих разработке схем других типов, и пользуются ими для общего ознакомления с изделием.

Функциональные схемы разъясняют определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом. Этими схемами пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте.

На структурной и функциональной схемах изображают все составные функциональные части изделия в виде прямоугольников или условных графических обозначений и связей между ними. Графическое построение схемы должно давать наиболее наглядное представление о последовательности взаимодействия функциональных частей в изделии. На структурной схеме рекомендуется на линиях взаимосвязи стрелками обозначать направление хода процессов, происходящих в изделии.

На схемах должно быть показано наименование каждой функциональной части изделия, если для ее обозначения применен прямоугольник. Если функциональная часть изображена в виде условного графического обозначения, то ее наименование не указывают. Допускается указывать тип элемента (устройства) и обозначение документа, на основании которого этот элемент применен. При изображении функциональных частей в виде прямоугольников наименования, типы и обозначения рекомендуется выписывать внутри прямоугольников.

Для структурных схем допускается взамен наименований, типов и обозначений проставлять порядковые номера справа от изображения или над ним сверху вниз в направлении слева направо. В этом случае наименования, типы и обозначения указывают в таблице, помещаемой на поле чертежа.

На функциональной схеме для каждой функциональной части изделия указывают позиционное обозначение, присвоенное ей на принципиальной схеме. На функциональной схеме рекомендуется указывать технические характеристики функциональных частей.

На структурных схемах допускается, а на функциональных рекомендуется помещать поясняющие надписи, диаграммы и таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также указываются параметры в характерных точках (токи, напряжения, формы и параметры импульсов, математические зависимости и т. д.).

Правила выполнения принципиальных схем

На принципиальной схеме изображают все электрические элементы или устройства, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, все электрические связи между ними,

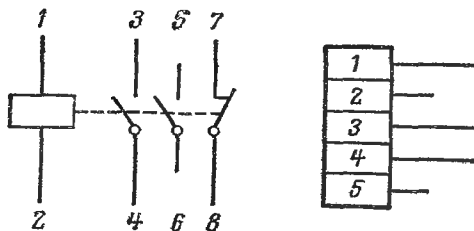


Рис. 2-18. Примеры изображения элементов устройства совмещенным способом.

а также электрические элементы (разъемы, зажимы и т. п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. Элементы на схеме изображают в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах ЕСКД. Схемы выполняются для изделий, находящихся в отключенном положении.

Каждый элемент или устройство, входящее в изделие и изображенные на схеме, должны иметь буквенно-цифровое позиционное обозначение. Порядковые номера присваиваются элементам, начиная с единицы, в пределах группы элементов, имеющих на схеме одинаковые буквенные обозначения, например $R1, R2, R3$ и т. д., $C1, C2, C3$ и т. д. Порядковые номера должны быть присвоены в соответствии с последовательностью расположения элементов или устройств на схеме сверху вниз в направлении слева направо.

Позиционные обозначения проставляют на схеме рядом с условным графическим обозначением элементов с правой стороны или над ними.

Элементы и устройства изображают на схеме совмещенным или разнесенным способом (рис. 2-18 и 2-19).

Разнесенным способом выполняют схемы телефонии и автоматики, схемы электрооборудования (где много контакторов, реле и различных контактов). При выполнении таких схем рекомендуется пользоваться строчным способом, располагая условные графические обозначения элементов, выходящих в одну цепь, последовательно друг за другом по

прямой, а отдельные цепи — одну под другой таким образом, чтобы изображения этих цепей образовали параллельные строки (горизонтальные или вертикальные). При выполнении схемы строчным способом допускается нумеровать строки арабскими цифрами (рис. 2-19).

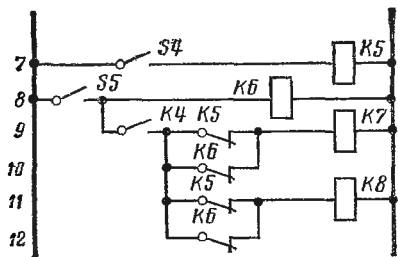


Рис. 2-19. Изображение элементов устройства разнесенным способом.

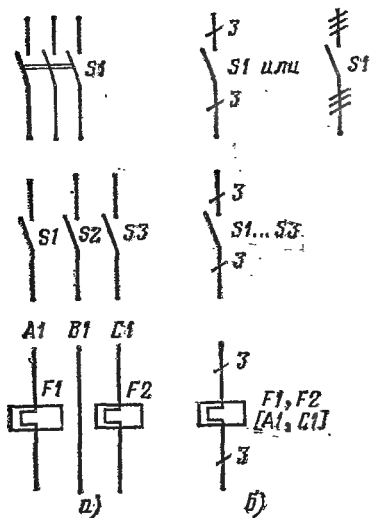


Рис. 2-20. Многолинейные (а) и однолинейные (б) изображения схем.

Линии связи должны быть показаны, как правило, полностью. Разрешается обрывать линии связи удаленных друг от друга элементов, если графическое изображение связей затрудняет чтение схемы, если схема выполняется на нескольких листах и т. д. Обрывы линий заканчивают стрелками с обозначением мест подключения. Для упрощения схемы можно несколько электрически не соединенных линий связи сливать в общую линию групповой связи, но при подходе к элементам (контактам) каждую линию связи изображают отдельной линией. Обозначения линий должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.709-72 и ГОСТ 2.751-73.

Схемы выполняют в многолинейном или однолинейном изображении. При многолинейном изображении каждую цепь изображают отдельной линией, а элементы, со-

державшиеся в этих цепях, — отдельными условными графическими обозначениями (рис. 2-20, а).

При однолинейном изображении цепи, выполняющие идентичные функции, изображают одной линией, а одинаковые элементы этих цепей — одним условным графическим обозначением (рис. 2-20, б).

На принципиальной схеме должны быть однозначно определены все элементы, входящие в состав изделия и изображенные на схеме. Данные об элементах записывают в перечень элементов (рис. 2-21). При этом связь перечня с условными графическими обозначениями элементов осуществляется через позиционные обозначения. Перечень элементов составляют в виде таблицы, размещаемой над основной надписью схемы на расстоянии не менее 12 мм. Продолжение перечня помещают слева от основной надписи, повторяя головку таблицы. Элементы в перечень записывают в направлении сверху вниз группами в алфавитном порядке буквенных обозначений.

В пределах каждой группы, имеющей одинаковые буквенные позиционные обозначения, элементы располагают по возрастанию порядковых номеров. Между отдельными группами элементов допускается оставлять несколько незаполненных строк. Элементы одного типа с одинаковыми электрическими параметрами, имеющие на схеме последовательные порядковые номера, допускается записывать в перечень в одну строку, например: R3, R4, R8, ..., R12; при этом в графе «Кол.» указывают общее количество таких элементов.

При записи элементов, имеющих одинаковую первую часть позиционных обозначений, допускается записывать наименование элементов в графе «Наименование» в виде общего заголовка (рис. 2-22). На схеме следует указывать обозначения выводов (контактов) элементов, нанесенные на изделие или установленные в их документацию; если таких указаний нет в документации изделия, то допускается условно присваивать контактам элементов обозначения на схеме; при этом на поле схемы помещают соответствующее пояснение.

На схеме рекомендуется указывать характеристики входных и выходных цепей изделия (частоту, напряжение, ток и т. п.), а также адреса внешних подключений, записывая их в таблицы, помещаемые взамен условных графических обозначений входных и выходных элементов (рис. 2-23). Каждой таблице присваивают позиционное обозначение элемента, взамен условного графического обозначения которого она помещена.

При отсутствии характеристик входных и выходных цепей или адресов их внешнего присоединения в таблице не приводят графу с этими данными. При необходимости допускается вводить в таблицу дополнительные графы.

Допускается проставлять в графе «Конт.» несколько последовательных номе-

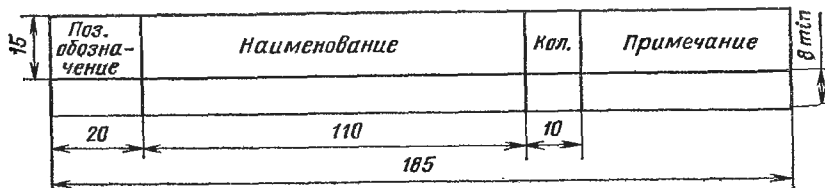


Рис. 2-21. Изображение таблицы перечня элементов.

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
	<u>Резисторы</u>		
R1	МЛТ-0,5-300 кОм ± 5% ГОСТ 7113-77	1	
R2	ИСП-I-A-560 Ом ± 10% -0С-3-12 ГОСТ 5574-73	1	
R3	ПЭВ-10-3 кОм ± 5% ГОСТ 6513-75	1	

Рис. 2-22. Заполнение перечня элементов.

ров контактов в случае, если они соединены между собой. Номера контактов отделяют друг от друга запятой.

При наличии в изделии нескольких одинаковых элементов, устройств или функциональных групп, соединенных параллельно, допускается вместо изображения всех ветвей параллельного соединения изображать только одну ветвь, указав количество ветвей при помощи обозначения ответвления.

Конт.	Цепь	Адрес
1	$\Delta r = 0,3...3 \text{ к}\Omega; R_H = 600 \text{ Ом}$	$= A1-X1:1$
2	$U_{вых} = 0,5 \text{ В}; R_H = 600 \text{ Ом}$	$= A1-X1:2$
3	$U_{вых} = +60 \text{ В}; R_H = 500 \text{ Ом}$	$= A1-X1:3$
4	$U_{вых} = +20 \text{ В}; R_H = 1 \text{ к}\Omega$	$= A1-X1:4$

Рис. 2-23. Обозначения входных и выходных элементов.

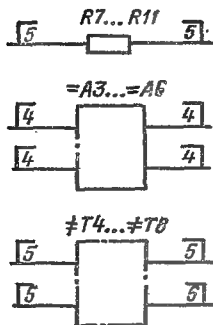


Рис. 2-24. Обозначения нескольких одинаковых элементов или устройств, соединенных параллельно.

Около графических обозначений элементов (устройств) проставляют их позиционные обозначения. При этом должны быть учтены все элементы, входящие в параллельное соединение (рис. 2-24). Элементы в этом случае записывают в перечень в одну строку.

При наличии в изделии трех и более одинаковых элементов (устройств, функциональных групп), соединенных последовательно, допускается вместо изображения

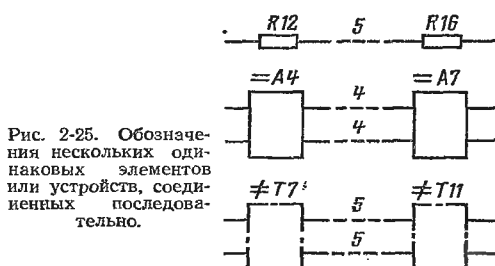


Рис. 2-25. Обозначения нескольких одинаковых элементов или устройств, соединенных последовательно.

всех последовательно соединенных элементов изображать только первый и последний элементы, показывая электрические связи между ними штриховыми линиями. При присвоении элементам (устройствам) позиционных обозначений учитываются все элементы, не изображенные на схеме. Над штриховой линией при этом указывают общее количество одинаковых элементов (рис. 2-25). Элементы в этом случае записывают в перечень в одну строку.

При оформлении принципиальных схем изделия, в состав которых входят устрой-

ства, имеющие самостоятельные принципиальные схемы, каждое такое устройство рассматривают как элемент схемы, изображают в виде прямоугольника или условного графического обозначения, присваивают ему позиционное обозначение и записывают в перечень элементов одной позицией.

На поле схемы допускается помещать указания о марках, сечениях и расцветках проводов и кабелей, которыми должны быть выполнены соединения элементов, а также указание о специфических требованиях к электрическому монтажу данного изделия.

Правила выполнения схем соединений и схем подключения

На схеме соединений должны быть изображены все устройства и элементы, входящие в состав изделия, их входные и вы-

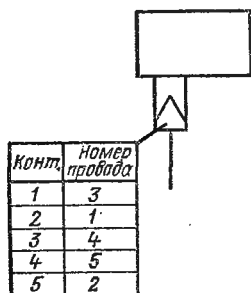


Рис. 2-26. Изображение таблицы подключения контактов.

ходные элементы, а также соединения между ними. Устройства и элементы на схеме изображают в виде прямоугольников, внешних очертаний или условных графических обозначений. При изображении элементов в виде прямоугольников допускается внутри них помещать условные графические обозначения элементов.

Входные и выходные элементы изображают условными графическими обозначениями или оформляют в виде таблицы (см. рис. 2-23).

Расположение графических обозначений устройств и элементов на схеме должно примерно соответствовать действительному размещению их в изделии. На схеме около графических обозначений устройств и элементов указывают позиционные обозначения, присвоенные им на принципиальной схеме. При отсутствии принципиальной схемы изделия позиционные обозначения элементам (устройствам) присваивают на схеме соединений и записывают их в перечень элементов по правилам для принципиальных схем.

Провода, группы проводов, жгуты и кабели указывают по правилам, установленным ГОСТ 2.709-72 и ГОСТ 2.751-73.

Около или внутри графического обозначения устройства допускается указывать его наименование и тип, обозначение документа, на основании которого это устройство применено. Около условных графических обозначений элементов допускается указывать тип и номинальные значения основных параметров.

На схеме следует указывать обозначения выводов элементов (устройств), установленные в их документации или присвоенные условно (в последнем случае на поле схемы помещают соответствующее пояснение). При изображении на схеме соединителей допускается применять условные графические обозначения, не показывающие отдельные контакты (ГОСТ 2.755-74). При этом около изображения соединителя помещают таблицы с указанием подключения контактов (рис. 2-26).

На схеме изделия, в состав которого входят многоконтактные элементы, линии,

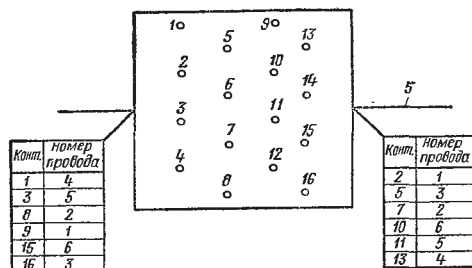


Рис. 2-27. Изображение таблицы подключения к многоконтактному изделию.

изображающие жгуты (кабели, группы проводов), допускается доводить только до контура графического обозначения элемента, не показывая присоединения к контактам. При этом у изображения многоконтактного элемента помещают таблицу с указанием подключения контактов (рис. 2-27).

Провода, жгуты, кабели и жилы кабелей должны быть обозначены отдельно порядковыми номерами в пределах изделия. Номера кабелей проставляют в окружностях, помещенных в разрывах изображений кабелей вблизи от мест разветвления жил. Номера жгутов проставляют на полках линий-выносок около мест разветвления проводов. Номера групп проводов проставляют около линий-выносок. Данные о проводах и кабелях (марки, сечения) указывают около линий, изображающих провода и кабели. Одинаковые марку, сечение и другие данные о всех или большинстве проводов и кабелей допускается указывать на поле схемы.

Если на схеме не указаны места соединений проводов и жил кабелей, то данные о проводах, жгутах и кабелях и адреса их соединений сводят в таблицу со-

Обозначение провода	Откуда идет	Куда поступает	Данные провода	Примечание

Рис. 2-28. Таблица соединений.

единений (рис. 2-28). Таблицу соединений помещают на первом листе схемы над основной надписью на расстоянии не менее 12 мм или оформляют в виде самостоятельного документа.

Заполняется таблица сверху вниз в порядке возрастания номеров проводов. При выполнении соединений отдельными проводами, жгутами проводов и кабелями в таблицу соединений вначале записывают отдельные провода (без заголовка), а затем (с соответствующими заголовками) жгуты проводов и кабели. Например, заголовок «Жгут 1» или «Кабель АБВГ.ХХХХХХ.032».

На поле схемы над основной надписью допускается помещать необходимые технические указания, например: требования о недопустимости совместной прокладки некоторых проводов, минимально допустимые расстояния между проводами, жгутами и кабелями и т. д.

На схеме подключения должны быть изображены: изделие в виде прямоугольника, его входные и выходные элементы в виде условных графических обозначений и подводимые к ним концы проводов и кабелей внешнего монтажа, около которых помещают данные о подключении изделия (характеристики внешних цепей и адреса). Размещение изображений входных и выходных элементов должно примерно соответствовать их действительному размещению в изделии, а позиционное обозначение соответствовать принципиальной схеме. Допускается указывать наименования и другие данные соединителей, к которым подключены провода и кабели, марки, сечения, расцветку проводов, марки кабелей, количество, сечение и занятость жил.

Правила выполнения общих схем и схем расположения

На общей схеме изображают устройства и элементы, входящие в комплекс, в виде прямоугольников, а также провода, жгуты и кабели, соединяющие эти устройства и элементы. Расположение графических обозначений устройств и элементов на схеме должно примерно соответствовать действительному размещению элементов и устройств в изделии.

На схеме должны быть указаны: для каждого устройства или элемента, изображенного в виде прямоугольника, — наименование, тип и обозначение документа, на основании которого они применены; для каждого элемента, изображенного в виде условного графического обозначения, — его тип или обозначение документа.

При большом количестве устройств и элементов рекомендуется эти сведения записывать в перечень элементов по форме, приведенной на чертеже. В этом случае графическим обозначением устройств и элементов присваивают позиционные обозначения. Устройства и элементы, сгруппированные в посты и помещения, рекомендуется записывать в перечень по постам и помещениям.

Провода, жгуты и кабели должны быть показаны на схеме отдельными линиями и обозначены отдельно порядковыми номерами в пределах изделия по правилам, установленным для схем соединений.

На схеме расположения изображают составные части изделия в виде внешних очертаний или условных графических обозначений, помещение или местность, на которых эти составные части будут расположены. Провода, группы проводов, жгуты и кабели изображают в виде отдельных линий или внешних очертаний.

Расположение графических обозначений составных частей должно обеспечивать правильное представление об их действительном размещении в конструкции, помещении, на местности. При выполнении схемы расположения допускается применять различные способы построения (аксонометрия, план, условная развертка, разрез конструкции и т. п.).

На схеме должны быть указаны: для каждого устройства или элемента, изображенного в виде внешнего очертания, — их наименование и тип, а также обозначение документа, на основании которого они применены; для элемента, изображенного условным графическим обозначением, наименование не указывают.

При большом количестве устройств и элементов рекомендуется выполнять перечень элементов (см. рис. 2-22). В этом случае условным графическим обозначениям присваивают позиционные обозначения,

2-6. УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СХЕМАХ

Обозначения общего применения (по ГОСТ 2.721-74)

Наименование	Обозначение
Поток электромагнитной энергии, сигнал электрический: а) в одном направлении	
б) в обоих направлениях не одновременно в) в обоих направлениях одновременно	
Регулирование линейное (общее обозначение)	
а) регулирование плавное	
б) регулирование ступенчатое	
в) регулирование по току	
г) регулирование ручкой	
д) регулирование нелинейное	
е) регулирование подстроечное	
ж) саморегулирование линейное	
з) саморегулирование нелинейное	
Элементы привода и управляющих устройств:	
а) привод электромашинный	
б) привод электромагнитный	
в) привод тепловой	
г) привод с помощью биметалла	

Электрические машины (по ГОСТ 2.722-68)

Устанавливаются три способа построения условных графических обозначений электрических машин: упрощенный однолинейный; упрощенный многолинейный (форма I); развернутый (форма II).

В упрощенных однолинейных обозначениях электрических машин обмотки статора и ротора изображают в виде окружностей. Выводы обмоток статора и ротора показывают одной линией с указанием на ней количества выводов в соответствии с требованиями ГОСТ 2.751-73.

В упрощенных многолинейных обозначениях обмотки статора и ротора изображают аналогично упрощенным однолинейным обозначениям, показывая выводы обмоток статора и ротора полностью.

В развернутых обозначениях обмотки статора изображают в виде цепочек полуокружностей, а обмотки ротора — в виде окружности (и наоборот).

Взаимное расположение обмоток изображают:

а) в машинах переменного тока и универсальных — с учетом или без учета сдвига фаз;

б) в машинах постоянного тока — с учетом или без учета направления магнитного поля, создаваемого обмоткой.

В примерах условных графических обозначений машин переменного тока и универсальных машин приведены обозначения, как правило, отражающие сдвиг фаз в обмотке; в примерах машин постоянного тока, как правило, без учета направления магнитного поля.

Выводы обмоток статора и ротора в обозначениях машин всех типов допускается изображать с любой стороны.

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

Обозначения элементов электрических машин

Обмотка добавочных полюсов, обмотка компенсационная



Обмотка статора машины переменного тока, обмотка последовательного возбуждения машины постоянного тока



Обмотка параллельного возбуждения машины постоянного тока, обмотка независимого возбуждения

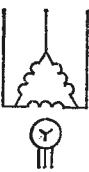
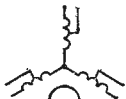
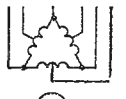


Статор. Общее обозначение



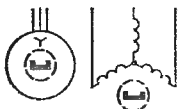
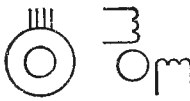
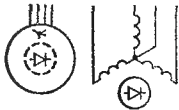
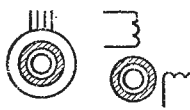
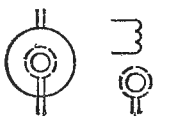
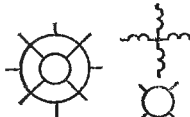
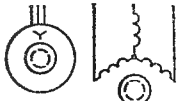
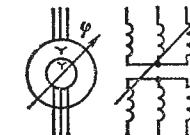
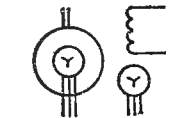
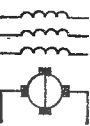
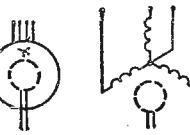
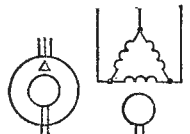
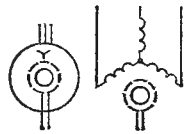
Продолжение

Продолжение

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Статор с трехфазной обмоткой:	Форма I Форма II	а) род машины (генератор — Г, двигатель — М, возбудитель — В, тахогенератор — ТГ и др.);	
а) соединенный в треугольник	 	б) род тока, число фаз или вид соединения обмоток в соответствии с требованиями ГОСТ 2.709-72, например генератор трехфазный	
б) соединенный в звезду	 	Размеры условных графических обозначений (по ГОСТ 2.747-68):	
Ротор. Общее обозначение		а) статор электрической машины	
Ротор без обмотки:		б) ротор электрической машины, обмотка трансформатора	
а) полный немагнитный или ферромагнитный		в) обмотка, катушка индуктивности	
б) явноразделный по окружности			
в) явноразделный с постоянными магнитами			
Ротор с распределенной обмоткой:		Примеры построения обозначений электрических машин	
а) трехфазный, соединенный в звезду			Форма I Форма II
б) трехфазный, соединенный в треугольник		Машина асинхронная трехфазная с фазным ротором; обмотка ротора соединена в звезду, обмотка статора — в треугольник	 
в) однофазный или постоянного тока			
г) короткозамкнутый			
Ротор внешний с короткозамкнутой распределенной обмоткой			
Ротор явноразделный с сосредоточенной обмоткой возбуждения		Машина асинхронная с переключением обмотки статора на два числа полюсов с короткозамкнутым ротором. Переключение обмотки статора:	
Ротор явноразделный с сосредоточенной обмоткой возбуждения и распределенной короткозамкнутой демпферной или пусковой обмоткой		а) со звезды на звезду с двумя параллельными ветвями	 
Ротор с обмоткой, коллектором и щетками		б) с треугольника на звезду с двумя параллельными ветвями	 
Машина электрическая. Общее обозначение			
Примечание. Внутри окружности допускается указывать следующие данные:			

Продолжение

Продолжение

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Машина асинхронная двухфазная:		Машина синхронная трехфазная с возбуждением от постоянных магнитов; обмотка статора соединена в звезду	
а) с короткозамкнутым ротором		Машина синхронная трехфазная (генератор) с самовозбуждением; обмотка статора соединена в звезду с выведенной нейтральной точкой	
б) с полым немагнитным ротором и неподвижным ферромагнитным магнитопроводом		Машина синхронная однофазная явнополюсная с обмоткой возбуждения и демпферной или пусковой обмоткой на роторе	
Трансформатор вращающийся, фазовращатель		Двигатель гистерезисный; обмотка статора соединена в звезду	
Автотрансформатор трехфазный поворотный (потенциал-регулятор)		Машина постоянного тока с независимым возбуждением	
Трансформатор трехфазный поворотный (фазорегулятор)		Машина постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов	
Сельсин-датчик, сельсин-приемник контактные однофазные с обмоткой возбуждения на статоре и обмоткой синхронизации на роторе, соединенной в звезду		Усилитель электромашиный с поперечным потоком и несколькими обмотками управления	
Машина синхронная трехфазная явнополюсная с обмоткой возбуждения на роторе; обмотка статора соединена в звезду с выведенной нейтральной точкой		Катушки индуктивности, реакторы, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители (по ГОСТ 2.723-68)	
Машина синхронная трехфазная неявнополюсная с обмоткой возбуждения на роторе; обмотка статора соединена в треугольник		Устанавливаются три способа построения условных графических обозначений трансформаторов и автотрансформаторов: упрощенный однолинейный; упрощенный многолинейный (форма I); развернутый (форма II).	
Машина синхронная трехфазная явнополюсная с обмоткой возбуждения и пусковой короткозамкнутой обмоткой на роторе; обмотка статора соединена в звезду		В упрощенных однолинейных обозначениях обмотки трансформаторов и автотрансформаторов изображают в виде окружностей. Выводы обмоток показывают одной линией с указанием на ней количества выводов в соответствии с требованиями ГОСТ 2.751-73. В автотрансформаторах сторону высшего напряжения изображают в виде развернутой дуги.	
		В упрощенных многолинейных обозначениях обмотки трансформаторов и автотрансформаторов изображают аналогично	

упрощенным однолинейным обозначениям, показывая выводы обмоток.

В развернутых обозначениях обмотки трансформаторов и автотрансформаторов показывают в виде цепочек полуокружностей.

Наименование	Обозначение	
	Форма I	Форма II

Обозначения элементов катушек индуктивностей, дросселей, трансформаторов, автотрансформаторов и магнитных усилителей

Обмотка трансформатора, автотрансформатора, дросселя и магнитного усилителя

Примечания:

1. Количество полуокружностей в изображении обмотки и направление выводов не устанавливаются

2. При изображении магнитных усилителей разнесенным способом используют следующие обозначения:

а) рабочая обмотка

б) управляющая обмотка

3. Для указания начала обмотки используют точку

Магнитопровод:

а) ферромагнитный

б) ферромагнитный с воздушным зазором

в) магнитодиэлектрический

г) немагнитный

Характер кривой намагничивания отражают при помощи следующих знаков:

а) прямоугольная петля гистерезиса

б) непрямоугольная петля гистерезиса

Примечание.

Размеры условных графических обозначений обмоток даны вместе с размерами обозначений электрических машин



Продолжение

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

Примеры построения обозначений катушек индуктивности, дросселей, трансформаторов, автотрансформаторов и магнитных усилителей

Катушка индуктивности, дроссель без магнитопровода



Реактор



Катушка индуктивности с отводами



Катушка индуктивности со скользящими контактами



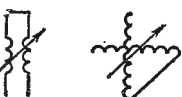
Катушка индуктивности с магнитодиэлектрическим магнитопроводом



Катушка индуктивности, подстраиваемая магнитодиэлектрическим магнитопроводом



Реактор (дроссель) с магнитопроводом



Вариометр

Гониометр



Трансформатор без магнитопровода:

а) с постоянной связью



б) с переменной связью

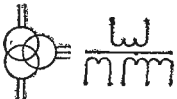


Форма I | Форма II

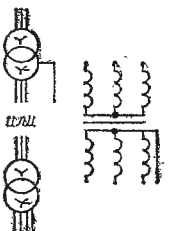
Трансформатор однофазный с магнитопроводом



Трансформатор однофазный с магнитопроводом трехобмоточный



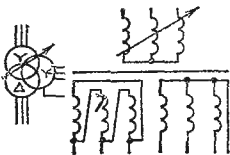
Трансформатор трехфазный с магнитопроводом, соединение обмоток звезда — звезда с выведенной нейтральной точкой



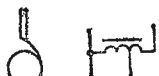
Продолжение

Наименование	Обозначение	
	Форма I	Форма II

Трансформатор трехфазный трехобмоточный с магнитопроводом; соединение обмоток звезда с регулированием под нагрузкой — треугольник — звезда с выведенной нейтральной точкой



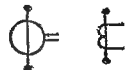
Автотрансформатор трехфазный с магнитопроводом;



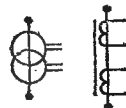
Автотрансформатор трехфазный с магнитопроводом; соединение обмоток в звезду



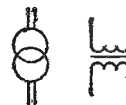
Трансформатор тока с одной вторичной обмоткой



Трансформатор тока с одним магнитопроводом и двумя вторичными обмотками



Трансформатор напряжения



Трансформатор однофазный с магнитопроводом и управляющей обмоткой



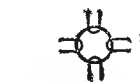
Усилитель магнитный с двумя рабочими и общей управляющей обмотками



Усилитель магнитный с двумя последовательно соединенными рабочими обмотками и двумя встречно включенными секциями управляющей обмотки



Элемент ферромагнитный, трансформатор запоминающий, элемент памяти



Примечание. Допускается применять развернутое изображение ферромагнитного элемента



Токосъемники (по ГОСТ 2.726-68)

Наименование	Обозначение
Токосъемник троллейный:	
а) общее обозначение	
б) управляемый пантограф)	
в) с третьего рельса	
Токосъемник кольцевой	
Примечание. Допускается использовать следующее обозначение	

Разрядники. Предохранители (по ГОСТ 2.727-68)

Наименование	Обозначение
Обозначения разрядников	
Промежуток искровой защитный (размеры по ГОСТ 2.747-68)	
Разрядник. Общее обозначение	

Обозначения предохранителей

Предохранитель пробивной	
Предохранитель плавкий. Общее обозначение (размеры по ГОСТ 2.747-68)	
Предохранитель инерционно-плавкий	
Предохранитель быстродействующий	
Катушка термическая (предохранительная)	

Продолжение

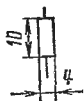
Наименование	Обозначение
Предохранитель с сигнализирующим устройством:	
а) с самостоятельной цепью сигнализации	
б) с общей цепью сигнализации	
в) без указания цепи сигнализации	
Выключатель-предохранитель	
Разъединитель-предохранитель	

Резисторы. Конденсаторы (по ГОСТ 2.728-74)

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

Обозначения резисторов общего применения

Резистор постоянный



Примечание. Если необходимо указать номинальную мощность рассеяния резисторов, то для диапазона от 0,05 до 5 Вт допускается использовать следующие обозначения резисторов, номинальная мощность рассеяния которых равна:

0,05 Вт

0,125 Вт

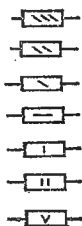
0,25 Вт

0,5 Вт

1 Вт

2 Вт

5 Вт



Продолжение

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

Резистор постоянный с дополнительными отводами:

а) одним симметричным



б) одним несимметричным



в) с двумя



Примечание. Если резистор имеет более двух дополнительных отводов, то допускается длинную сторону обозначения увеличивать, например резистор с шестью дополнительными отводами



Шунт измерительный



Резистор переменный



Резистор переменный в реостатном включении:

а) общее обозначение



б) нелинейное регулирование

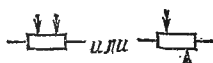


Резистор переменный с дополнительными отводами



Резистор переменный с несколькими подвижными контактами:

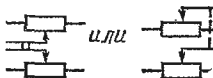
а) механически не связанными



б) механически связанными



Резистор переменный двоединный



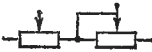
Резистор переменный с замыкающим контактом, изображенный:

а) совмещенно



б) разнесенно



Продолжение	
Наименование	Обозначение
Резистор подстроечный:	
а) общее обозначение	
б) в реостатном включении	
Резистор переменный с подстройкой	
Примечание. Приведенному изображению соответствует следующая эквивалентная схема:	
Тензорезистор:	
а) линейный	
б) нелинейный	
Элемент нагревательный	
Терморезистор:	
а) прямого подогрева	
б) косвенного подогрева	
Варистор	

Обозначения функциональных потенциометров, предназначенных для генерирования нелинейных неперпобических функций

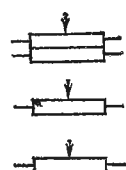
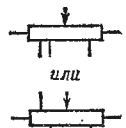
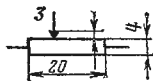
Потенциометр функциональный однообмоточный

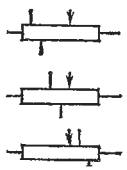
Потенциометр функциональный однообмоточный с несколькими дополнительными отводами

Потенциометр функциональный многообмоточный, например двухобмоточный, изображенный:

а) совмещенно

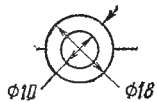
б) разнесенно



Продолжение	
Наименование	Обозначение
Потенциометр функциональный многообмоточный, например трехобмоточный с двумя дополнительными отводами от каждой обмотки, изображенный:	
а) совмещенно	
б) разнесенно	

Обозначения функциональных кольцевых замкнутых потенциометров, предназначенных для циклического генерирования нелинейных функций

Потенциометр функциональный кольцевой замкнутый однообмоточный с одним подвижным контактом и двумя отводами



Потенциометр функциональный кольцевой замкнутый однообмоточный с несколькими подвижными контактами, например, с тремя:

а) механически не связанными



б) механически связанными

Потенциометр функциональный кольцевой замкнутый однообмоточный с изолированным участком



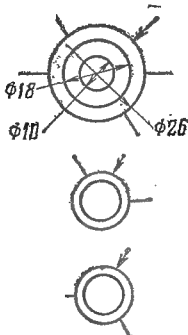
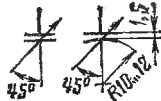
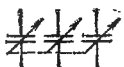
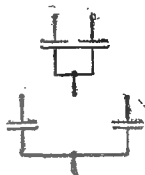
Потенциометр функциональный кольцевой замкнутый однообмоточный с короткозамкнутым участком



Примечание. Кольцевой сектор, соответствующий короткозамкнутому участку, допускается не зачернять

Продолжение

Продолжение

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Потенциометр функциональный кольцевой замкнутый многообмоточный, например двухобмоточный с двумя отводами от каждой обмотки, изображенный: а) совмещенно б) разнесенно Примечание. Все угловые размеры в обозначениях (углы между линиями отводов, между подвижными механически связанными контактами, размеры и расположение секторов изолированных или короткозамкнутых участков) должны быть приблизительно равны соответствующим угловым размерам в конструкции потенциометров		Конденсатор проходной Примечание. Дуга обозначает наружную обкладку конденсатора (корпус) Конденсатор опорный Конденсатор с последовательным собственным резистором Конденсатор в экранирующем корпусе: а) с одной обкладкой, соединенной с корпусом б) с выводом от корпуса Конденсатор переменной емкости Конденсатор переменной емкости многосекционный, например трехсекционный Конденсатор подстроечный Конденсатор дифференциальный Вариконд Фазовращатель емкостный	          
Обозначения конденсаторов Конденсатор постоянной емкости Конденсатор электролитический: а) полярный б) неполярный Конденсатор постоянной емкости с тремя выводами (двухсекционный), изображенный: а) совмещенно б) разнесенно	  		

Электроизмерительные приборы (по ГОСТ 2.729-68)

Продолжение

Наименование	Обозначение
Прибор измерительный (размеры по ГОСТ 2.747-68)	
а) показывающий	
б) регистрирующий	
в) интегрирующий (наприм., счетчик)	
Для указания назначения прибора в его обозначение вписывают буквенные обозначения измеряемых величин или их единиц, например:	
а) амперметр	A
б) вольтметр	V
в) вольтамперметр	VA
г) ваттметр	W
д) варметр	varW
е) микроамперметр	μA
ж) милливольтметр	mV
з) омметр	Ω
и) мегаомметр	M Ω
к) частотомер	Hz
л) фазометр:	
измеряющий сдвиг фаз	φ
измеряющий коэффициент мощности	$\cos \varphi$
м) счетчик ампер-часов	Ah
н) счетчик ватт-часов	Wh
о) счетчик вольт-ампер-часов	varh
реактивный	t°
п) измеритель температуры, пирометр	t°
р) индикатор полярности	$\pm$
Если необходимо указать характеристику отсчетного устройства прибора, то в его обозначение вписывают следующие графические обозначения:	
а) прибор, подвижная часть которого может отклоняться в одну сторону от нулевой отметки?	
вправо	
влево	
б) прибор, подвижная часть которого может отклоняться в обе стороны от нулевой отметки	
в) прибор вибрационной системы	
г) прибор с цифровым отсчетом	
д) прибор с непрерывной регистрацией (записывающий)	
е) прибор с точечной регистрацией (записывающий)	
ж) прибор с цифровой регистрацией (печатающий)	
з) прибор с регистрацией перфорированием	

Наименование	Обозначение
Например:	
вольтметр с цифровым отсчетом	
вольтметр с непрерывной регистрацией	
амперметр с отклонением стрелки в обе стороны	
Гальванометр	
Синхроскоп	
Осциллоскоп	
Осциллограф	
Гальванометр осциллографический:	
а) тока или напряжения	
б) мгновенной мощности	
Счетчик импульсов	
Болометр полупроводниковый	
Термопара. Утолщенная сторона обозначения соответствует отрицательной полярности	
Термопреобразователь:	
а) бесконтактный	
б) контактный	
Полупроводниковые приборы (по ГОСТ 2.730-73)	

Наименование	Обозначение
Обозначения конструктивных элементов	
Корпус полупроводникового прибора	
Вывод полупроводникового прибора:	
а) электрически не соединенный с корпусом	
б) электрически соединенный с корпусом	
Вывод от корпуса	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Обозначения физических элементов	
Подложка полупроводникового прибора	—
Базовая область (база)	⊥
Примечание. Если полупроводниковый прибор имеет несколько баз, то их выводы изображают с одной стороны линии, обозначающей подложку	⏏
Эмиттерная область (эмиттер) <i>p</i> -типа с <i>n</i> -областью	⏏
Эмиттерная область (эмиттер) <i>n</i> -типа с <i>p</i> -областью	⏏
Примечание. Если полупроводниковый прибор имеет несколько эмиттеров, то их выводы допускается изображать с обеих сторон линии, обозначающей подложку	⏏ или ⏏
Коллекторная область (коллектор)	⏏
Примечание. Если полупроводниковый прибор имеет несколько коллекторов, то их выводы допускается изображать с обеих сторон линии, обозначающей подложку	⏏
Переход между областями полупроводника с различными типами электропроводности	⏏
Область собственной электропроводности (<i>i</i> -область):	
а) между двумя областями с электропроводностью разного типа (<i>p-i-n</i> или <i>n-i-p</i>)	⏏
б) между двумя областями с электропроводностью одного типа (<i>p-i-p</i> или <i>n-i-n</i>)	⏏
в) между коллектором и областью с противоположным типом электропроводности (<i>p-i-n</i> или <i>n-i-p</i>)	⏏
Исток, сток, затвор	Затвор Исток Затвор Исток или Исток Затвор Исток Затвор
Знаки, характеризующие физические свойства полупроводниковых приборов	
Туннельный эффект:	
а) прямой	⏏
б) обращенный	⏏

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Эффект лавинного пробоя:	
а) односторонний	
б) двусторонний	
Температурная зависимость	t°
Фотоэлектрический эффект	

Примеры построения обозначений полупроводниковых диодов

Диод. Общее обозначение	
Туннельный диод	
Обращенный диод	
Стабилитрон:	
а) односторонний	
б) двусторонний	
Варикап	

Примеры построения обозначений тиристоров

Диодный тиристор (динистор)	
Диодный симметричный тиристор (диак)	
Триодный незапираемый тиристор с управлением по аноду (тиристор с инжектирующим управляющим электродом n-типа)	
Триодный незапираемый тиристор с управлением по катоду (тиристор с инжектирующим управляющим электродом p-типа)	
Триодный запираемый тиристор с управлением по аноду	
Триодный запираемый тиристор с управлением по катоду	
Триодный симметричный незапираемый тиристор (триак)	

Примечание. Для упрощения допускается выполнять условные графические обозначения тиристоров в зеркальном изображении

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

Примеры построения обозначений транзисторов с р-п

Транзистор типа <i>р-п-р</i>		
<i>D</i>	12	14
<i>A</i>	9	11

Транзистор типа *п-р-п* с коллектором, электрически соединенным с корпусом

Лавинный транзистор типа *п-р-п*

Однопереходный транзистор с *п*-базой

Однопереходный транзистор с *р*-базой

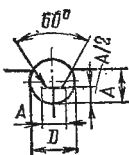
Транзистор типа *р-п-р* с двумя базовыми выводами

Транзистор типа *р-п-п* с выводом от *б*-области

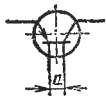
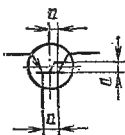
<i>D</i>	12	14
<i>a</i>	2,5	3,5

Транзистор типа *р-п-п*

Многоэмиттерный транзистор типа *п-р-п*





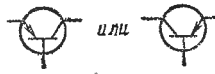






Примечание. Для упрощения допускается:

а) выполнять обозначения транзистора в зеркальном изображении, например:

б) проводить линию электрической связи от эмиттера или коллектора в одном из двух направлений: перпендикулярно или параллельно линии вывода базы



Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

Примеры построения обозначений полевых транзисторов

Полевой транзистор с каналом <i>n</i> -типа			
<i>D</i>	12	14	
<i>a</i>	2,5	3,5	
<i>b</i>	3	4	
Полевой транзистор с каналом <i>p</i> -типа			
Полевой транзистор с изолированным затвором:			
а) обогащенного типа с <i>p</i> -каналом			
б) обогащенного типа с <i>n</i> -каналом			
в) обедненного типа с <i>p</i> -каналом			
г) обедненного типа с <i>n</i> -каналом			
Полевой транзистор с изолированным затвором обогащенного типа с <i>p</i> -каналом с выводом от подложки			
Полевой транзистор с изолированным затвором обогащенного типа с <i>n</i> -каналом с внутренним соединением подложки и источника			
Полевой транзистор с двумя изолированными затворами обедненного типа с <i>n</i> -каналом и с выводом от подложки			
Примечание.			
Изображение окружности является обязатель-			

Примеры построения обозначений фотоэлектрических и излучающих полупроводниковых приборов

Фоторезистор	
Фотодиод	
Фототиристор	
Фототранзистор типа <i>р-п-п</i>	

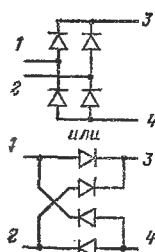
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Светоизлучающий диод $R=(5 \text{ или } 6) \text{ мм}$	
Оптопара диодная	
Тиристорная оптопара (оптроновый тиристор)	
Резисторная оптопара	

Примеры изображения типовых схем на полупроводниковых диодах

Однофазная мостовая выпрямительная схема:

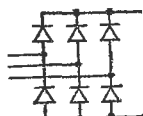
а) развернутое изображение



б) упрощенное изображение

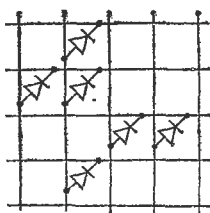


Трехфазная мостовая выпрямительная схема



Диодная (фрагмент)

матрица



Источники света (по ГОСТ 2.732-68)

Наименование	Обозначение
<i>Знаки, характеризующие работу приборов</i>	
Излучение:	
а) видимое	×
б) ультрафиолетовое	⊗
в) инфракрасное	⊗
Давление:	
а) низкое	•
б) высокое	⋮
в) сверхвысокое	⋮
Излучение импульсное	⌒

Примеры построения обозначений источников света

Лампа накаливания осветительная и сигнальная

Лампа накаливания двухнитевая

Лампа газоразрядная осветительная и сигнальная

Лампа газоразрядная низкого давления с простыми электродами

Лампа газоразрядная импульсная высокого давления с комбинированными электродами и внутренним поджигом

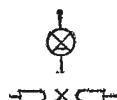
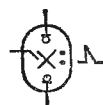
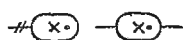
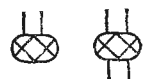
Лампа газоразрядная ультрафиолетового излучения низкого давления с комбинированными электродами

Лампа накаливания инфракрасного излучения

Лампа дуговая

Прибор индикации электролюминесцентный некоммутируемый

Однолинейное | Многолинейное



Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Прибор индикации электролюминесцентный коммутируемый:	
а) с односторонним управлением	
б) с двусторонним управлением	

Химические источники тока
(по ГОСТ 2.742-68)

Наименование	Обозначение
Элемент гальванический или аккумуляторный (размеры по ГОСТ 2.747-68)	
Примечание. Допускается знаки полярности не указывать	
Батарея из гальванических элементов или аккумуляторов	
Примечание. Батарею допускается обозначать так же, как в п. 1 настоящей таблицы. При этом над обозначением проставляют напряжение батареи	
Батарея с отводами	
Батарея с одинарным элементным коммутатором	

Электротермические устройства
и установки (по ГОСТ 2.745-68)

Устанавливаются два способа построения условных графических обозначений электронагревателей, электротермических устройств и установок: упрощенный и развернутый. При упрощенном способе электронагреватели, электротермические устройства и установки изображают соответствующими обозначениями, приведенными ниже, показывая выводы. При развернутом способе изображения в обозначения электронагревателей электротермических устройств и установок вписывают знаки, характеризующие способ нагрева и режим. Выводы располагают, как указано на рис. 2-29.

Условные графические обозначения устройств и установок допускается поворачивать вместе с выводами только на угол 90° против часовой стрелки,

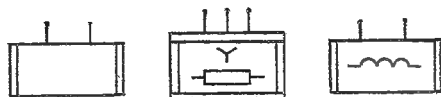


Рис. 2-29. Расположение выводов электротермических устройств.

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

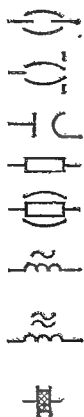
Общие обозначения электронагревателей электротермических устройств и установок (размеры по ГОСТ 2.747-68)

Электронагреватель	
Устройство электротермическое:	
а) с камерой нагрева (электропечь)	
б) без камеры нагрева	
Установка электротермическая:	
а) с камерой нагрева	
б) без камеры нагрева	

Знаки, характеризующие способ нагрева, режим и назначение электронагревателей, электротермических устройств и установок

Способ нагрева:

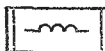
- а) дуговой
 б) плазменный
 в) электронный
 г) сопротивлением
 д) смешанный (дуговой и сопротивлением)
 е) индукционный, током промышленной частоты
 ж) индукционный, током повышенной частоты
 з) в высокочастотном поле конденсатора (диэлектрический)



Продолжение

Наименование	Обозначение
Режим непрерывный	
Признак устройства (установки), предназначенного для плавки	
Примечание. Знак непрерывного режима изображают над знаком способа нагрева, а знак плавки — под ним	

Примеры построения обозначений
электронагревателей, электротермических
устройств и установок

Электронагреватель индукционный	
Электротермическое устройство с камерой нагрева (электронепчь)	
а) сопротивления, непрерывного режима	
б) индукционное плавильное	
Электротермическая установка дуговая (с камерой нагрева)	

Род тока и напряжения, виды соединения
обмоток, формы импульсов
(по ГОСТ 2.750-68)

Наименование	Обозначения
--------------	-------------

Обозначения рода тока и напряжения

Ток постоянный	
Ток переменный. Общее обозначение	
Примечания: 1. Для указания диапазона частот используют следующие обозначения:	
а) наименьшие частоты	
б) средние частоты	
в) наибольшие частоты	
2. Допускается использовать общее обозначение переменного тока с указанием частоты, например ток переменный частотой 10 кГц	
Ток пульсирующий	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначения
Ток постоянный и переменный (обозначение используется для устройств, пригодных для работы на постоянном и переменном токе)	
Ток переменный с числом фаз m и частотой f Например, ток переменный трехфазный 50 Гц	$m \sim f$ $3 \sim 50 \text{ Гц}$
Ток переменный с числом фаз m , частотой f и напряжением U	$m \sim f, U$
Полярность отрицательная	—
Полярность положительная	+

Обозначения видов соединений обмоток

Соединение обмоток двух фаз в открытый треугольник	
Обмотка трехпроводная двухфазная	L
Обмотка четырехпроводная двухфазная	X
Обмотка трехфазная, соединенная в звезду	Y
Обмотка трехфазная, соединенная в звезду с выведенной нейтралью	Y
Обмотка трехфазная, соединенная в треугольник	Δ
Обмотка трехфазная, соединенная в разомкнутый треугольник	$\triangleleft$
Обмотка трехфазная, соединенная в зигзаг	
Обмотка шестифазная, соединенная в многоугольник	
Обмотка шестифазная, соединенная в звезду	*
Обмотка шестифазная, соединенная в две обратные звезды	
Обмотка шестифазная, соединенная в два треугольника	
Обмотка шестифазная, соединенная в двойной зигзаг	

Обозначения наиболее часто встречающихся импульсов

Импульс высокой частоты (радиопимпульс)	
Импульс прямоугольный положительный	
Импульс прямоугольный отрицательный	
Импульс остроугольный положительный	
Импульс остроугольный отрицательный	
Перепад напряжения	
Импульс пилообразный	
Импульс трапецидальный	
Импульс с крутым фронтом	
Импульс с крутым спадом	

Линии электрической связи, провода, кабели и шины (по ГОСТ 2.751-73)

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
<i>Общие обозначения линий электрической связи, проводов, кабелей и шин</i>	
Линия электрической связи. Провод, кабель, шина	
Линия групповой связи	
Графическое слияние линий электрической связи в линию групповой связи	
Экранирование группы линий электрической связи	
Линия электрической связи экранированная	
Обрыв линии электрической связи	
Примечание. На месте знака X указывают необходимые данные о продолжении линии на схеме	
Заземление	
Корпус (машины, аппарата, прибора)	
Излом линии электрической связи:	
а) под углом 90°	
б) под углом 135°	
Графическое пересечение двух линий электрической связи, электрически не соединенных. Линии должны пересекаться под углом 90°	
Линия электрической связи с ответвлениями:	
а) одним	
б) двумя	
Группа линий электрической связи, имеющих общее функциональное назначение:	
а) однолинейное	
б) многолинейное	

Примечания:

1. В однолинейных обозначениях *n* должно быть заменено числом, указывающим количество линий в группе.

Наименование	Обозначение
2. В однолинейных обозначениях элементов или устройств, содержащих группы линий, допускается применять следующие обозначения:	
а) группы из двух линий	
б) группы из трех линий	
Например; лампа накаливания	
Переход группы линий электрической связи, имеющих общее функциональное назначение, от многолинейного обозначения к однолинейному	
Группа линий электрической связи, имеющих общее функциональное назначение, каждая из которых экранирована	
Графическое слияние трех групп, условно обозначенных номерами 1, 2 и 3 и содержащих соответственно пять, восемь и десять линий электрической связи	
Восемь линий электрической связи, каждая из которых имеет ответвление	
Восемь линий электрической связи, каждая из которых экранирована и имеет ответвления	
Группа линий электрической связи в общем экране	
Группа линий электрической связи, четыре из которых находятся в общем экране	
Линия электрической связи, осуществляемая двухжильным кабелем	
Группа линий электрической связи, осуществляемая многожильным кабелем	

Однолинейное Многолинейное

Однолинейное Многолинейное

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Группа линий электрической связи, четыре из которых осуществлены многожильным кабелем	
Группа линий электрической связи, осуществленная скрученными проводами	
Группа линий электрической связи, четыре из которых осуществлены скрученными проводами	
Линия электрической связи осуществляется гибким проводом	

Коммутационные устройства и контактные соединения (по ГОСТ 2.755-74)

Коммутационные устройства на схемах должны изображаться в положении, принятом за начальное. При этом направление движения подвижных контактов из начального положения к конечному не устанавливается.

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

Обозначения контактов коммутационных устройств

Контакт коммутационного устройства. Общее обозначение:

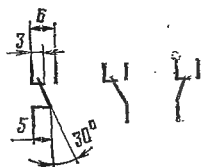
а) замыкающий



б) размыкающий



в) переключающий



Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

Примечание. Варианты, приведенные в пп. «а», «б» и «в», распространяются на все соответствующие условные графические обозначения

г) переключающий без размыкания цепи



д) переключающий со средним положением



е) с двойным замыканием



ж) с двойным размыканием



Контакт в контактной группе, срабатывающий раньше по отношению к другим контактам группы:

а) замыкающий



б) размыкающий



Контакт в контактной группе, срабатывающий позже по отношению к другим контактам группы:

а) замыкающий



б) размыкающий



Контакт замыкающий с замедлителем, действующим:

а) при срабатывании



б) при возврате



в) при срабатывании и возврате



Продолжение табл.

Продолжение

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Контакт размыкающий с замедлителем, действующим:		Контакт разъединителя	
а) при срабатывании		Контакт выключателя-разъединителя	
б) при возврате		Контакт с автоматическим возвратом при перегрузке	
в) при срабатывании и возврате		Контакт с механической связью:	
Примечание. Обозначение замедлителя допускается изображать с противоположной стороны обозначения подвижного контакта, например контакт без самовозврата:		а) замыкающий	
а) замыкающий		б) размыкающий	
б) размыкающий		Контакт, чувствительный к температуре (термоконтакт):	
а) замыкающий		а) замыкающий	
б) размыкающий		б) размыкающий	
Контакт с самовозвратом:		Контакт электротеплового реле при разнесенном способе изображения реле	
а) замыкающий			
б) размыкающий			
Контакт для коммутации силовоточной цепи:			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			
б) размыкающий			
а) замыкающий			

Продолжение

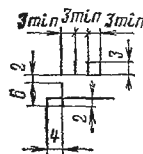
Наименование	Обозначение
в) обратного тока	$I \leftarrow$
г) максимального напряжения	$U >$
д) минимального напряжения	$U <$
е) максимальной температуры	$T^\circ >$
Знаки проставляют около обозначения выключателя, например:	
выключатель трехполюсный автоматический максимального тока	
Выключатель высоко-го напряжения*	
Отделитель*	
Короткозамыкатель*	
Выключатель путевой:	
а) однополюсный	
б) многополюсный, например трехполюсный	
Разъединитель трехполюсный	
Переключатель многополюсный, например трехполюсный	
Выключатель кнопочный нажимной:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	

Продолжение

Наименование	Обозначение
Выключатель кнопочный вытяжной:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
Выключатель кнопочный поворотный:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
Выключатель кнопочный без самовозврата:	
а) нажимной с возвратом посредством вытягивания кнопки	
б) нажимной с возвратом посредством вторичного нажатия кнопки	

Примеры построения обозначений многопозиционных коммутационных устройств

Переключатель однополюсный многопозиционный, например четырехпозиционный



Переключатель многопозиционный независимых цепей, например шести цепей



Переключатели со сложной коммутацией изображают на схеме одним из следующих способов:

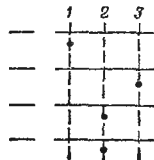
первый способ. Переключатель изображают в виде условного обозначения, а на поле схемы помещают таблицу замыкания контактов



второй способ



третий способ



* Указания методические межотраслевые (УММ) по применению государственных стандартов ЕСКД в электрических схемах комплектных устройств и в схемах технологического контроля и автоматики энергетических объектов, 1977 г.

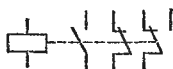
Продолжение

Продолжение

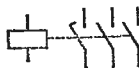
Наименование	Обозначение
Переключатель двух- полюсный 3-позиционный с нейтральным положе- нием	
Переключатель двух- полюсный 3-позиционный с самовозвратом в ней- тральное положение	

Примеры построения обозначений реле

Реле электрическое с
замыкающим, размыкаю-
щим и переключающим
контактами



Реле электрическое с
замыкающими контак-
тами, один из которых
срабатывает раньше дру-
гих

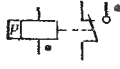


Реле поляризованное:

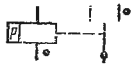
а) на одно направле-
ние тока в обмотке с
самовозвратом



б) на одно направле-
ние тока в обмотке без
самовозврата



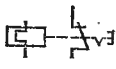
в) на оба направления
тока в обмотке с ней-
тральным положением



Примечание.

Контакт, отмеченный
точкой, замыкается при
приложении напряжения
постоянного тока, поло-
жительный полюс кото-
рого подан к выводу,
отмеченному точкой

Реле электротепловое
без самовозврата (с
возвратом нажатием
кнопки)



Обозначения контактов контактных соединений

Контакт контактного
соединения:

а) разъемного соеди-
нения:

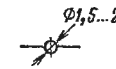
штырь



гнездо



б) разборного соеди-
нения



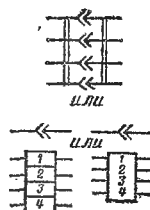
в) неразборного сое-
динения



Наименование	Обозначение
Контакт скользящий:	
а) по линейной токо- проводящей поверхности	
б) по нескольким ли- нейным токопроводящим поверхностям	
в) по кольцевой токо- проводящей поверхности	
г) по нескольким кольцевым токопроводя- щим поверхностям	

Примеры построения контактных соединений

Соединение контак-
тное разъемное четырех-
проводное



Соединение контак-
тное разъемное коакси-
альное (высокочастот-
ное)



Перемычка контак-
тная



Перемычка коммута-
ционная

а) на размыкание



б) с выведенным гнез-
дом



в) на переключение

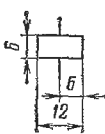
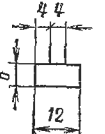
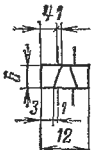
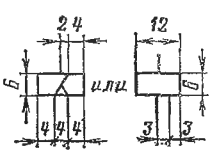


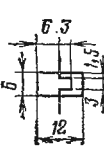
Вставка-переключ-
атель



Воспринимающая часть электромеханических устройств (по ГОСТ 2.756-76)

Продолжение

Наименование	Обозначение
Катушка электромеханического устройства	
Примечание. Выводы допускаются изображать с одной стороны прямоугольника	
Катушка электромеханического устройства с двумя обмотками	
Катушка электромеханического устройства с n обмотками	
Катушка электромеханического устройства с двумя встречными обмотками	
Катушка электромеханического устройства с одним отводом	
Катушка электромеханического устройства с указанным вида обмотки:	
а) обмотка напряжения	
б) обмотка максимального тока	
Катушка поляризованного электромеханического устройства	
Катушка электромеханического устройства, обладающего остаточным намагничиванием	
Катушка электромеханического устройства, имеющего механическую блокировку	

Наименование	Обозначение
Катушка электромеханического устройства, работающего с ускорением при срабатывании	
Катушка электромеханического устройства, работающего с ускорением при срабатывании и отпуске	
Катушка электромеханического устройства, работающего с замедлением при срабатывании	
Катушка электромеханического устройства, работающего с замедлением при отпуске	
Воспринимающая часть электротеплового реле	

Двоичные логические элементы (по ГОСТ 2.743-72)

Условное графическое обозначение двоичного логического элемента имеет форму прямоугольника, который может содержать три поля: основное и два дополнительных. В основном поле помещают информацию о функции, выполняемой логическим элементом, — символ функции. В дополнительных полях помещают условные обозначения входов и выходов, называемые метками.

Допускается в основном поле помещать дополнительные данные по ГОСТ 2.708-72.

Входы логического элемента изображают с левой стороны, выходы — с правой стороны прямоугольника.

Не допускается:

а) проставлять у входов и выходов условного графического обозначения стрелки, указывающие направление потоков информации;

б) поворачивать условное графическое обозначение;

в) проводить входные и выходные линии на уровне горизонтальных сторон прямоугольника;

г) изображать выводы на горизонтальных сторонах прямоугольника.

Размеры условного графического обозначения определяют:

а) по высоте: количеством входных или выходных линий; количеством интервалов между группами входных и выходных линий; количеством строк информации в основном поле; размером шрифта;

б) по ширине: наличием дополнительных полей; необходимым количеством знаков, помещаемых в одной строке (с учетом необходимых пробелов); размером шрифта.

Все размеры условного графического обозначения по высоте должны быть кратны постоянному размеру *С*. При этом расстояние между горизонтальной стороной прямоугольника и ближайшей входной (выходной) линией, а также между соседними входными (выходными) линиями должно быть не менее *С*.

При разделении группы входных (выходных) линий интервалом его величина должна быть не менее *2С*. Размер *С* должен быть не менее 5 мм.

Если в основном поле помещают только символ функции, состоящий не более чем из трех знаков, то размеры основного поля должны быть в миллиметрах:

Минимальная высота	«	»	*	От 10 до 12
Ширина	.	.	.	От 8 до 12

Если в основном поле помещают дополнительные данные с количеством знаков в строке не более пяти, то размеры основного поля должны быть в миллиметрах:

Минимальная высота	«	»	*	От 20 до 25
Ширина	.	.	.	От 12 до 17

При необходимости поместить в условном графическом обозначении большее количество информации размеры основного поля допускается соответственно увеличивать.

Ширина дополнительного поля при записи меток, состоящих из одного знака, должна быть не менее 5 мм. При записи меток, состоящих более чем из одного знака, ширина дополнительного поля должна быть соответственно увеличена.

Наименование	Обозначение
Основное поле	
Основное поле с левым и правым дополнительными полями	
Основное поле с дополнительными полями, разделенными на зоны	
Входы логического элемента	
Выходы логического элемента	

Максимальный размер (диаметр) индикатора входа (выхода) не должен превышать 3 мм.

Обозначение функций

Функцию или систему функций, выполняемую логическим элементом, обозначают при помощи символа функции.

Правила построения символов функций: а) символ функции должен условно отражать основное функциональное назначение (функцию) логического элемента;

б) в качестве символа функции используют знак (букву, цифру или специальный знак) или последовательность знаков, записанных без пробелов;

в) количество знаков в символе функции не ограничивается;

г) при построении символа функции не допускается применять: строчные буквы, римские цифры, буквы, не входящие в русский и латинский алфавиты (например, греческие или готические); применение букв латинского алфавита является предпочтительным; не допускается включать в символ функции или записывать в одной строке с ним технические характеристики, эксплуатационные и прочие данные.

Символ функции помещают внутри основного поля в верхней его части. Если в основном поле записывают дополнительные данные, то их следует располагать ниже символа функции.

Наименование	Обозначение
ИЛИ	1
И	&
Сложение по модулю 2	M2
Эквивалентность	=
Исключающее ИЛИ («1 и только 1»)	=1
«n и только n»	=n
Примечание. n — натуральное число, больше единицы, например 2	=2
Логический порог	≥
Примечания:	
1. n — натуральное число, больше единицы, например	
2. Допускается использовать знак ≥	
Мажоритарность	≥M
Дешифратор	DC
Шифратор	CD
Сравнение	= =
Полусумматор	HS
Сумматор	SM
Триггер	T
Триггер двухступенчатый	TT
Регистр	RG
Счетчик	CT
Генератор	G
Одновибратор	S
Задержка	I
Пороговый элемент (триггер Шмитта)	⌋
Усилитель	∇
Усилитель с повышенной нагрузочной способностью (усилитель мощности)	∇∇
Формирователь сигнала	F

Обозначения на входах и выходах

Входы и выходы логического элемента подразделяют на прямые и инверсные (рис. 2-30 — 2-37).



Рис. 2-30. Прямой статический вход.



Рис. 2-31. Прямой статический выход.

На прямом входе (выходе) двоичная переменная имеет значение 1, когда сигнал на этом входе (выходе) находится в состоянии, принятом за «единичное».

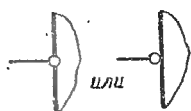


Рис. 2-32. Инверсный статический вход.

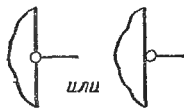


Рис. 2-33. Инверсный статический выход.

На инверсном входе (выходе) двоичная переменная имеет значение 1, когда сигнал на этом входе (выходе) находится в состоянии, принятом за «нулевое».



Рис. 2-34. Прямой динамический вход.

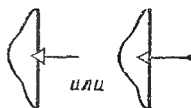


Рис. 2-35. Прямой динамический выход.

Входы (выходы) логического элемента подразделяют на статические и динамические,

Значение двоичной переменной на статическом входе (выходе) воспринимается (вырабатывается) все время, пока сигнал



Рис. 2-36. Инверсный динамический вход.

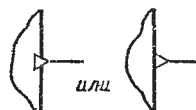


Рис. 2-37. Инверсный динамический выход.

на этом входе (выходе) находится в одном определенном состоянии.

Значение двоичной переменной на динамическом входе (выходе) воспринимается (вырабатывается) только в те промежутки времени, когда состояние сигнала на этом входе (выходе) изменяется определенным образом.

Выводы логических элементов, не несущие логической информации, допускается изображать на левой и (или) на правой стороне условного графического обозначения логического элемента (рис. 2-38).



Рис. 2-38. Выводы, не несущие логической информации.

Комбинационные логические элементы

Для комбинационных элементов, построенных на основе логических операций И, ИЛИ, НЕ, допускается применять две формы условных графических обозначений (логически эквивалентные формы).

Для получения логически эквивалентной формы необходимо с исходным условным графическим обозначением выполнить следующие преобразования:

- все прямые входы и выходы заменить на инверсные;
- все инверсные входы и выходы заменить на прямые;
- символ функции & заменить на 1 (и 1 заменить на &);
- метки входов & заменить на 1 (и 1 заменить на &);

Наименование	Таблица истинности	Обозначение
--------------	--------------------	-------------

Примеры обозначений комбинационных логических элементов с равноценными входами

1. Повторитель	<table><tr><th>x</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x	y	0	0	1	1																															
x	y																																					
0	0																																					
1	1																																					
2. НЕ (инвертор)																																						
3. ИЛИ (дизьюнктор)	<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x_1	x_2	y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1																						
x_1	x_2	y																																				
0	0	0																																				
0	1	1																																				
1	0	1																																				
1	1	1																																				
4. ИЛИ — НЕ (элемент Пирса)	<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x_1	x_2	y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0																						
x_1	x_2	y																																				
0	0	1																																				
0	1	0																																				
1	0	0																																				
1	1	0																																				
5. И (конъюнктор)	<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x_1	x_2	y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1																						
x_1	x_2	y																																				
0	0	0																																				
0	1	0																																				
1	0	0																																				
1	1	1																																				
6. И — НЕ (элемент Шеффера)	<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x_1	x_2	y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0																						
x_1	x_2	y																																				
0	0	1																																				
0	1	1																																				
1	0	1																																				
1	1	0																																				
7. Сложение по модулю 2 (нечетность)	<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>x_3</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x_1	x_2	x_3	y	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	
x_1	x_2	x_3	y																																			
0	0	0	0																																			
0	0	1	1																																			
0	1	0	1																																			
0	1	1	0																																			
1	0	0	1																																			
1	0	1	0																																			
1	1	0	0																																			
1	1	1	1																																			
8. Сложение по модулю 2 с отрицанием (четность)	<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>x_3</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x_1	x_2	x_3	y	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	
x_1	x_2	x_3	y																																			
0	0	0	1																																			
0	0	1	0																																			
0	1	0	0																																			
0	1	1	1																																			
1	0	0	0																																			
1	0	1	1																																			
1	1	0	1																																			
1	1	1	0																																			

Примеры обозначений комбинационных логических элементов с неравноценными входами
Функциональные расширители

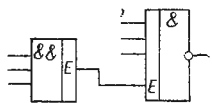
При изображении разнесенным способом функциональных расширителей и логических элементов, к которым расширители подключены, символ функции расширителя должен указывать:

а) операцию, выполняемую над входными переменными расширителя, например И;

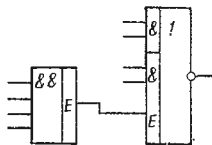
б) функцию, выполняемую основным элементом над результатом операции расширителя, например ИЛИ.

Наименование	Обозначение
--------------	-------------

1. Функциональный расширитель И для расширения по И (однополюсное подключение расширителя)



2. Функциональный расширитель И для расширения группы входов по И (однополюсное подключение расширителя)



Триггеры

В настоящем разделе устанавливается следующая классификация триггеров:

а) по способу записи информации:
несинхронизируемые (асинхронные) триггеры;

синхронизируемые (синхронные) триггеры;

б) по способу синхронизации:
синхронные триггеры со статическим управлением записью;

синхронные двухступенчатые триггеры;
синхронные триггеры с динамическим управлением записью;

в) по способу организации логических связей:

триггеры с раздельной установкой состояний 0 и 1 (RS-триггеры);

триггеры со счетным входом (Т-триггеры);

универсальные триггеры с раздельной установкой состояний 0 и 1 (JK-триггеры);

триггеры с приемом информации по одному входу (D-триггеры);

универсальные триггеры с управляемым приемом информации по одному входу (DV-триггеры);

комбинированные триггеры (RST-, JKRS-, DRS-триггеры и т. д.);

триггеры со сложной входной логикой.

В условном графическом изображении триггера выход 0 должен графически отличаться от выхода 1 наличием индикатора логического отрицания.

Логический индикатор на входе триггера указывает, при каком значении логической переменной происходит определенное воздействие на состояние триггера.

Функциональное назначение входов триггера

Наименование	Обозначение
1. Вход для раздельной установки триггера в состояние 1 (S-вход)	S
2. Вход для раздельной установки триггера в состояние 0 (R-вход)	R
3. Вход для установки состояния 1 в универсальном JK-триггере (J-вход)	J
4. Вход для установки состояния 0 в универсальном JK-триггере (K-вход)	K
5. Счетный вход (T-вход)	T
Примечание. В простейшем случае, когда триггер имеет только счетный вход, метка T может отсутствовать	
6. Информационный вход для установки триггера в состояния 1 и 0 (D-вход)	D
7. Подготовительный управляющий вход для разрешения приема информации (V-вход)	V
8. Исполнительный управляющий (командный) вход для осуществления приема информации. Вход синхронизации (C-вход)	C
Примечание к пп. 7 и 8. Метки V и C допускается применять в условных графических обозначениях комбинационных логических элементов для обозначения входов, подготавливающих и разрешающих выполнение логической операции.	
Примечание. При необходимости к буквам допускается добавлять цифры, например S1, S2, C1, C2, C3 и т. д.	

Обозначения элементарных асинхронных триггеров

Наименование	Логическая структура	Таблица состояний																
1. RS-триггер с прямыми входами		<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>Q</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>Q*</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>н/о</td></tr></table>	A	B	Q	0	0	Q*	0	1	0	1	0	1	1	1	н/о	
A	B	Q																
0	0	Q*																
0	1	0																
1	0	1																
1	1	н/о																
2. JK-триггер		<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>Q</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>Q*</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>Q*</td></tr></table>	A	B	Q	0	0	Q*	0	1	0	1	0	1	1	1	Q*	
A	B	Q																
0	0	Q*																
0	1	0																
1	0	1																
1	1	Q*																
3. Триггер со счетным входом (Т-триггер)		<table><tr><th>A</th><th>Q</th></tr><tr><td>0</td><td>Q*</td></tr><tr><td>1</td><td>Q*</td></tr></table>	A	Q	0	Q*	1	Q*	или или									
A	Q																	
0	Q*																	
1	Q*																	

Примечания: 1. В таблицах состояний приняты следующие обозначения:
н/о — состояние триггера не определено;

Q* — хранение состояния триггера;

Q* — изменение состояния триггера на противоположное.

2. Буквенные обозначения у входных и выходных линий приведены для пояснения.

Обозначения D-триггеров

Наименование	Логическая структура	Обозначение
1. D-триггер со статическим управлением		
2. D-триггер, построенный по принципу двухступенчатого заполнения информации		
3. D-триггер с динамическим исполнительным управляющим входом		

Сложные логические элементы

Наименование	Обозначение
Дешифратор (декодер). Общее обозначение	
Примечания: 1. Входы помечают десятичными числами, изображающими двоичные веса. 2. Выходы помечают десятичными изображениями соответствующих кодовых комбинаций. 3. Допускается изображать неполный набор выходов. 4. $p=2^{n-1}$; $m=2^n-1$, где n — число двоичных разрядов дешифруемого кода.	
Двоичный счетчик с двухтактной синхронизацией, возможностью установки кода и асинхронным входом установки счетчика в состояние 0.	
Примечание. Меткой +1 обозначен суммирующий (счетный) вход.	

Прочие логические элементы

Наименование	Временная диаграмма	Обозначение
Цифровой элемент задержки. Общее обозначение		
Цифровой элемент задержки с несколькими выходами В дополнительном поле допускается указывать: а) численные значения времен задержки по каждому выходу; б) относительные коэффициенты; в) произвольные метки		
Моностабильный элемент (одновибратор): а) с импульсным входом б) с потенциальным входом в) с задержкой на входе		

Продолжение

Наименование	Временная диаграмма	Обозначение
Генератор стандартных сигналов: а) автоколебательный		
б) управляемый (ждущий)		
Пороговый элемент (триггер Шмита)		
Усилитель	—	
Усилитель-инвертор	—	
Усилитель с повышенной нагрузочной способностью (усилитель мощности)	—	
Формирователь сигнала	—	

Правила выполнения схем цифровой вычислительной техники

Правила выполнения схем цифровой вычислительной техники устанавливает ГОСТ 2.708-72. При выполнении схем цифровой вычислительной техники (функциональных и принципиальных) двоичные логические элементы изображают в виде условных графических обозначений по ГОСТ 2.743-72.

В основном поле условного графического обозначения логического элемента допускается помещать кроме символа функции по ГОСТ 2.743-72 следующие дополнительные данные:

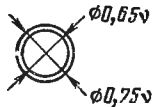
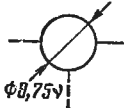
- тип устройства, в состав которого входит логический элемент;
- условный шифр логического элемента;
- обозначение зоны, в которой изображен логический элемент или порядковый номер логического элемента;
- позиционное обозначение устройства, в состав которого входит логический элемент;
- конструктивное обозначение устройства, в состав которого входит логический элемент;
- условный номер логического элемента в устройстве, в состав которого этот элемент входит.

Вычислительные машины аналоговые и аналого-цифровые (по ГОСТ 23335-78)

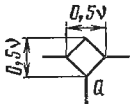
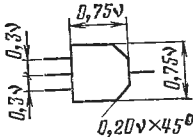
Обозначения элементов и устройств в схемах моделирования

Наименование	Обозначение
Усилитель операционный	
Усилитель суммирующий	
Усилитель интегрирующий	
Усилитель дифференцирующий	
Усилитель операционный с дифференциальным входом	
Нелинейный блок	
То же с собственным выходным усилителем	
То же без собственного выходного усилителя	
Блок переменного запаздывания	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Блок постоянного коэффициента	
Блок переменного коэффициента	
Элемент перемножения	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Ключ	
Компаратор	

Раздел 3

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРОФИЗИКЕ

СОДЕРЖАНИЕ

3-1. Электромагнитные явления в проводниках и полупроводниках	70	электронная эмиссия (91). Фотоэлектронная эмиссия (91). Вторичная электронная эмиссия (92). Вторичная эмиссия под действием положительных ионов, метастабильных атомов и излучения разряда (92)	
Зонная теория (70). Собственная и примесная электропроводности полупроводников (72). Контактные явления на границе полупроводника с металлом (73). Электронно-дырочный переход (74). Гальваномагнитные явления (75). Магнитооптические явления (77). Внутренний фотоэффект (77). Люминесценция (78)		3-6. Движение электронов и ионов в вакууме и газах	93
3-2. Электрические процессы в диэлектриках	79	Электрический ток в вакууме (93). Столкновения электронов и ионов с атомами и молекулами газа (93). Движение электронов и ионов в газе (94)	
Поляризация диэлектриков (79). Электропроводность диэлектриков (81). Пробой диэлектриков (82)		3-7. Виды электрического разряда в газах	96
3-3. Электромагнитные явления в ферромагнетиках	85	Темный разряд и развитие самостоятельного разряда (96). Тлеющий разряд (97). Дуговой разряд (97). Коронный и искровой разряды (98). Газовая плазма (99)	
Процессы намагничивания (85). Вихревые токи при перемещении магнитной вязкость (86)		3-8. Основы квантовой электроники	101
3-4. Сверхпроводимость	87	3-9. Электромагнитные явления в проводящей движущейся среде	103
Основные сведения (87). Электромагнитные свойства сверхпроводников (88). Области применения сверхпроводников (90)		Уравнения магнитогидродинамики (103). «Вмороженность» и «диффузия» магнитного поля (104). Магнитное давление, электромагнитные насосы и ускорители (104)	
3-5. Электронная эмиссия	90	Список литературы	106
Термоэлектронная эмиссия (90). Авто-			

3-1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДНИКАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ¹

Зонная теория

Анализ электромагнитных явлений в твердых телах базируется на зонной теории. Согласно квантовой теории энергия электронов в изолированном атоме имеет дискретные значения. В качестве примера на рис. 3-1 изображена диаграмма возмож-

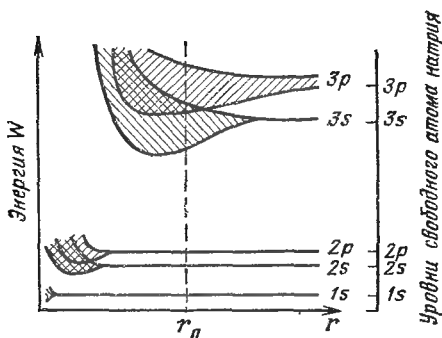


Рис. 3-1. Энергетические уровни атомов натрия.

ных значений энергии свободного атома натрия. Расстояние между уровнями уменьшается при увеличении энергии. Согласно принципу Паули на одном и том же энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположные спины. Заполненные уровни образуют электронные оболочки атома, которые обычно обозначаются цифрами 1, 2, 3..., определяющими главное квантовое число. Начиная со второй, оболочки разбиваются на подоболочки: 2s, 2p, 3s, 3p, 3d...

При взаимодействии большого числа атомов, образующих кристалл, энергетические уровни электронов изменяются. Эти изменения тем больше, чем дальше от ядра находится электрон. Наибольшие изменения касаются энергии внешних валентных электронов. Это объясняется тем, что при объединении N одинаковых атомов, образующих твердое тело, каждый уровень энергии изолированного атома расщепляется на N близко расположенных друг к другу уровней, которые образуют определенной ширины зону. Расстояние между уровнями в зоне зависит от концентрации атомов. Так, при концентрации около 10^{28} м^{-3} и при ширине зоны, равной 1 эВ, уровни располагаются друг от друга на расстоянии 10^{-28} эВ .

Изменение уровней и образование энергетических зон для атомов натрия при их сближении показаны на рис. 3-1. Картина

расщепления энергетических уровней атома в зоне соответствует периоду кристаллической решетки r_0 . Таким образом, в твердом теле вместо системы отдельных уровней энергии, свойственных изолированному атому, появляется система энергетических зон, каждая из которых происходит из соответствующего уровня электронов атома и состоит из близко расположенных уров-

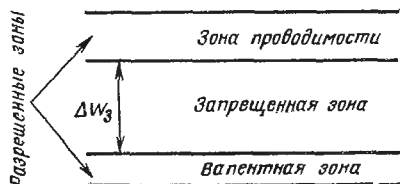


Рис. 3-2. Структура энергетических зон твердого тела.

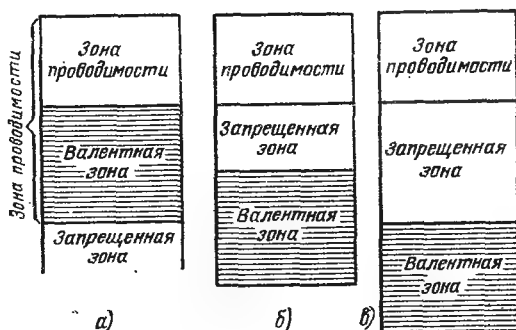


Рис. 3-3. Зонная структура при $T=0 \text{ К}$.

а — для проводников; б — для полупроводников; в — для диэлектриков.

ией. Зоны разрешенных уровней энергии отделены друг от друга некоторым интервалом энергии, который называется запрещенной зоной (рис. 3-2). Ширина запрещенной зоны ΔW_z определяет электрические свойства твердого тела. В основе классификации электротехнических материалов лежит структура зон твердого тела при нулевой температуре (рис. 3-3). У проводников зона проводимости и валентная зона перекрываются (рис. 3-3, а) и даже при нулевой температуре значительное количество электронов находится в зоне проводимости, что обуславливает электропроводность проводников.

Зонные структуры полупроводников (рис. 3-3, б) и диэлектриков (рис. 3-3, в) таковы, что разрешенная зона при нулевой температуре полностью заполнена электронами и ближайшая расположенная выше разрешенная зона (зона проводимости) отделена от нее запрещенной зоной. Разница между полупроводниками и диэлектриками заключается в ширине запрещенной зоны ΔW_z . Если для диэлектриков ΔW_z достигает нескольких электронвольт (например,

¹ Подпараграфы «Зонная теория», «Собственная и примесная электропроводности полупроводников», «Контактные явления на границе полупроводника с металлом», «Электронно-дырочный переход» написаны А. Н. Старостиным.

для алмаза $\Delta W_s = 5,6$ эВ, то для полупроводников она значительно меньше: для германия $\Delta W_s = 0,67$ эВ, для кремния $\Delta W_s = 1,11$ эВ.

Энергетические уровни по высоте разрешенной зоны распределены неравномерно, плотность их изменяется от границы в глубь зоны. Таким образом, каждому уровню с энергией W соответствует определенная плотность $P(W)$ — число уровней, отнесенное к единице энергии и единице объема твердого тела.

Вероятность нахождения электрона на том или ином уровне определяется распределением Ферми — Дирака:

$$F_n(W) = \frac{1}{e^{\frac{W - W_F}{kT}} + 1},$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; W_F — энергия уровня Ферми.

Если энергию выражать не в джоулях, а в электронвольтах или вольтах (численно эти величины одинаковы), то необходимо энергию W и kT разделить на элементарный заряд e и формула переписывается в виде

$$F_n(\varphi) = \frac{1}{e^{\frac{\varphi - \varphi_F}{\varphi_T}} + 1},$$

где φ — потенциал, характеризующий энергию, В; φ_F — уровень Ферми, В; φ_T — температурный потенциал, В.

При $T = 300$ К (соответствует комнатной температуре) температурный потенциал

$$\varphi_T (300\text{K}) \approx 0,025 \text{ В} = 25 \text{ мВ}.$$

Потенциал уровня Ферми φ_F соответствует такому энергетическому уровню, вероятность заполнения которого равна $1/2$. С физической точки зрения потенциал Ферми — электрохимический потенциал, который равен сумме электрического и химического потенциалов:

$$\varphi_F = \varphi_E + \varphi_x.$$

Химический потенциал характеризует возможность диффузии свободных частиц (заряженных и незаряженных). Химический потенциал является однозначной функцией концентрации соответствующих частиц. Наличие разности химических потенциалов означает наличие разности концентраций, а разность концентраций вызывает диффузию частиц в направлении от большей концентрации к меньшей. Электрический потенциал характеризует возможность дрейфа заряженных свободных частиц.

Потенциал Ферми, отсчитанный от границы той или иной зоны (т. е. без учета потенциальной энергии), есть химический потенциал соответствующих носителей.

Градиент потенциала Ферми, равный сумме градиентов электрического и химического потенциалов, характеризует оба типа движения носителей — диффузию и дрейф.

В условиях равновесия, когда нет направленного движения носителей, $\text{grad} \varphi_F = 0$, т. е. $\varphi_F = \text{const}$. Постоянство («горизонтальность») уровня Ферми в равновесной системе является одним из фундаментальных положений квантовой теории твердого тела.

Полупроводники, у которых концентрация свободных носителей заряда меньше эффективной плотности состояний в разрешенной зоне, называют невырожденными. Для этих полупроводников справедливо распределение Максвелла — Больцмана

$$F_n = e^{-\frac{\varphi - \varphi_F}{\varphi_T}}.$$

В невырожденных полупроводниках уровень Ферми всегда расположен в запрещенной зоне. Полупроводники, у которых концентрация свободных носителей заряда существенно превышает эффективную плотность состояний в разрешенной зоне, называют вырожденными или полуметаллами. Для них распределение Максвелла — Больцмана несправедливо. Уровень Ферми для вырожденных полупроводников расположен внутри соответствующей разрешенной зоны. Это относится также к металлам.

Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости может происходить под воздействием тепловой или световой энергии, под действием электрического поля или какого-либо корпускулярного излучения. Для такого перехода энергия воздействия должна быть равна или превосходить ширину запрещенной зоны ($h\nu \geq \Delta W_s$). Вероятность перехода электронов в зону проводимости под воздействием тепла является экспоненциальной функцией температуры:

$$w \approx e^{-\frac{\Delta W_s}{kT}}.$$

Для низких температур эта вероятность мала и полупроводники при температурах, близких к $T = 0$ К, ведут себя как диэлектрики. Однако уже при комнатной температуре концентрация электронов n в зоне проводимости значительна. Так, у германия $n \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

При переходе электронов в зону проводимости в валентной зоне образуются вакантные квантовые состояния (дырки), которые ведут себя в кристаллической решетке подобно положительно заряженной частице с той же эффективной массой и зарядом, что и электрон. Концентрация электронов n_i в зоне проводимости и дырок в зоне валентных электронов p_i одинаковы ($p_i = n_i$).

Собственная и примесная электропроводности полупроводников

Полупроводники, в которых концентрация электронов и дырок равны, называются собственными. Перенос электрических зарядов в таких полупроводниках при воздействии электрического поля осуществляется электронами и дырками и электропроводность их называется собственной. Электрическая проводимость собственных полупроводников

$$\gamma = e n_i \mu_n + e p_i \mu_p,$$

где e — заряд электрона; n_i , p_i — концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике; μ_n , μ_p — подвижности электронов и дырок.

Легирование собственного полупроводника примесью существенно влияет на его электрическую проводимость. Примесь нарушает периодичность кристаллической решетки и образует в энергетическом спектре

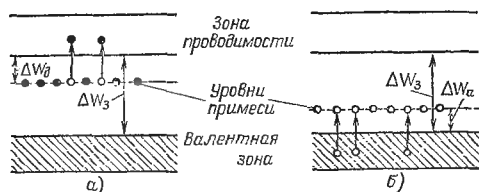


Рис. 3-4. Энергетические уровни примеси.

а — донорная примесь; б — акцепторная примесь.

полупроводника дополнительные уровни, которые располагаются в запрещенной зоне. Если энергетический уровень примеси находится вблизи дна зоны проводимости на расстоянии ΔW_d (рис. 3-4, а), то в этом случае более вероятным является переход электронов с уровней примеси в зону проводимости, так как $\Delta W_d \ll \Delta W_a$. Концентрация свободных электронов в таких полупроводниках увеличивается и становится существенно больше концентрации дырок. Такие примеси называются донорными. Электропроводность полупроводников, легированных донорной примесью, осуществляется главным образом электронами и поэтому она называется электронной или *n*-типа (*negative* — отрицательный). Электроны в таких полупроводниках являются основными носителями, дырки — неосновными.

Если уровни электронов атомов примеси располагаются вблизи валентной зоны (рис. 3-4, б), то под действием тепловой энергии валентные электроны могут переходить на уровни примеси, где они становятся связанными. В этом случае увеличивается концентрация дырок. Такие примеси называются акцепторными. Электропроводность полупроводников, легированных акцепторными примесями, осуществляется главным образом дырками, и она называется

дырочной или *p*-типа (*positive* — положительный). Дырки в таких полупроводниках являются основными носителями, а электроны — неосновными.

Германий и кремний, в зависимости от типа внесенных в них примесей, могут иметь электронную или дырочную электропроводность. Германий и кремний принадлежат к IV группе элементов периодической таблицы Д. И. Менделеева, и их атомы имеют по четыре валентных электрона.

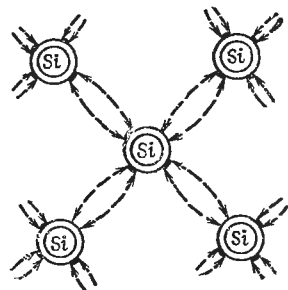


Рис. 3-5. Плоский эквивалент кристаллической решетки кремния.

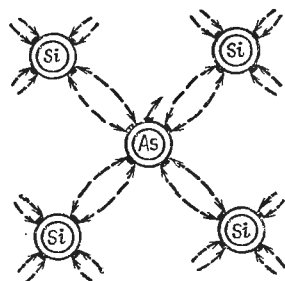


Рис. 3-6. Плоский эквивалент кристаллической решетки кремния, легированного донорной примесью.

В твердом состоянии они имеют кристаллическую решетку типа алмаза, в которой каждый атом связан с четырьмя другими атомами ковалентными (парноэлектронными) связями. На рис. 3-5 изображен плоский эквивалент кристаллической решетки кремния. При внедрении в решетку кремния (или германия) атомов донорной примеси (элементов V группы), например мышьяка, фосфора или сурьмы, атом примеси замещает в ней атом основного элемента и образует четыре ковалентные связи с окружающими его атомами (рис. 3-6). Оставшийся пятый валентный электрон атома мышьяка связан с ним очень слабо, и этот электрон становится свободным. Таким образом, концентрация электронов в кремнии или германии при введении донорной примеси возрастает и электропроводность его становится электронной (*n*-типа).

При внедрении в решетку кремния (или германия) атомов акцепторной приме-

си (элементов III группы), например бора, индия, алюминия или галлия, атом примеси замещает в ней атом основного элемента. Три валентных электрона атома примеси образуют ковалентную связь с валентными электронами соседних атомов основного полупроводника, а одна связь в решетке остается незаполненной. Заполнение этих связей осуществляется за счет валентных электронов соседних атомов, где в результате образуются дырки (рис. 3-7).

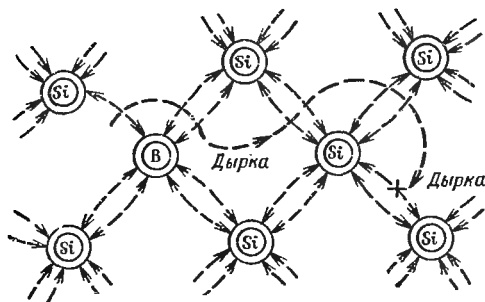


Рис. 3-7. Плоский эквивалент кристаллической решетки кремния, легированного акцепторной примесью.

Концентрация дырок в кремнии (или германии) при введении акцепторной примеси возрастает и электропроводность его становится дырочной (p -типа).

При одновременном введении в полупроводник донорной и акцепторной примесей характер электропроводности будет определяться примесью, имеющей более высокую концентрацию.

Контактные явления на границе полупроводника с металлом

Структура и свойства контактов полупроводника с металлом зависят от расположения уровней Ферми в них. Уровень Ферми в металле всегда расположен в зоне проводимости, а в невырожденном полупроводнике — в запрещенной зоне. В состоянии термодинамического равновесия системы, включающей в себя металл и полупроводник, уровень Ферми становится единым.

На рис. 3-8 приведены зонные диаграммы выпрямляющих контактов металла с полупроводниками p - и n -типов. Для контактирующих образцов металла и полупроводника p -типа, показанных на рис. 3-8, а, потенциал уровня Ферми в металле φ_{FM} выше потенциала уровня Ферми в полупроводнике. В этом случае энергетические уровни, соответствующие зоне проводимости полупроводника, в металле заполнены больше, чем в полупроводнике. Следовательно, после соприкосновения слоев часть электронов из металла перейдет в полупроводник и зарядит его отрицательно, металл при этом зарядится положительно. В результате на границе возникает электрическое

поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов из металла. Наличие дополнительных электронов в граничном слое полупроводника p -типа приведет к уменьшению расстояния между уровнем Ферми и дном зоны проводимости, поэтому энергетические уровни в граничном слое искривляются вниз. При этом концентрации основных носителей заряда (дырок) в приконтактном слое полупроводника уменьшаются, а неосновных (электронов) — увели-

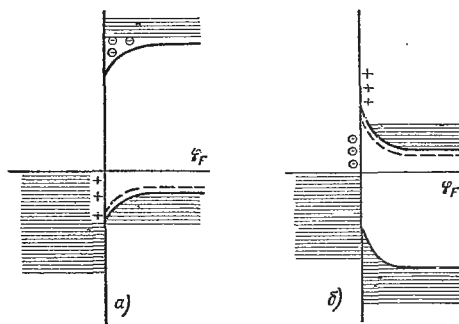
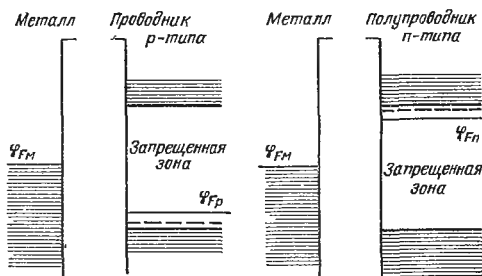


Рис. 3-8. Зонные диаграммы выпрямляющих контактов металла с полупроводником.

а — контакт с полупроводником p -типа; б — контакт с полупроводником n -типа

чивается. Для контактирующих образцов металла и полупроводника n -типа, показанных на рис. 3-8, б, потенциал уровня Ферми в металле φ_{FM} ниже потенциала уровня Ферми в полупроводнике φ_{FS} . В этом случае энергетические уровни, соответствующие зоне проводимости полупроводника, в металле заполнены меньше, чем в полупроводнике. Следовательно, после соприкосновения слоев часть электронов из полупроводника перейдет в металл и зарядит его отрицательно, при этом полупроводник зарядится положительно. В результате на границе возникает электрическое поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов из полупроводника. Уменьшение концентрации электронов в граничном слое полупроводника приводит к увеличению расстояния между уровнем Ферми и дном зоны проводимости, поэтому зоны искривляются вверх, при этом концентрация основных носителей (электронов)

уменьшается, а неосновных (дырок) — увеличивается.

Рассмотренные случаи контактов металла с полупроводником характеризуются уменьшением концентрации основных носителей заряда в граничном слое полупроводника по сравнению с концентрацией их в объеме вдали от границы контакта и, следовательно, увеличением удельного сопротивления граничного слоя.

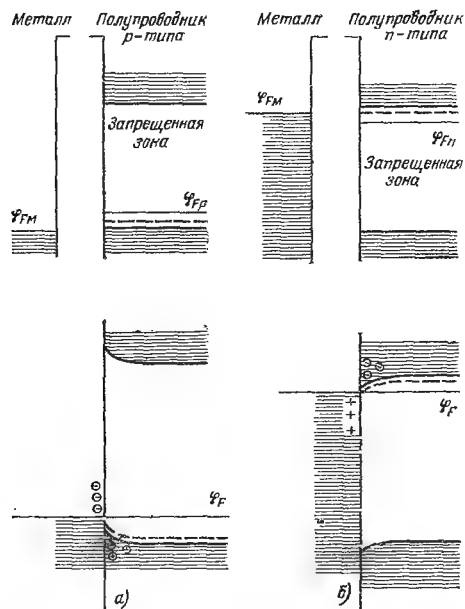


Рис. 3-9. Зонные диаграммы невыпрямляющих контактов металла с полупроводником.

а — контакт с полупроводником p -типа; б — контакт с полупроводником n -типа.

В зависимости от приложенного внешнего напряжения и его полярности изменяется напряженность электрического поля в приповерхностном слое и соответственно изменяется сопротивление граничного слоя. Таким образом, контакты металла с полупроводником, показанные на рис. 3-8, обладают вентильными свойствами. На их основе созданы диоды Шоттки.

На рис. 3-9 показаны диаграммы энергетических зон для невыпрямляющих контактов металла с полупроводниками p - и n -типов, для которых выполняются соотношения $\varphi_{FM} < \varphi_{FP}$ (рис. 3-9, а) и $\varphi_{FM} > \varphi_{FN}$ (рис. 3-9, б). В этих случаях искривления зон в полупроводниках получаются обратными по сравнению с теми, что показаны на рис. 3-8, а и б, при этом граничные слои полупроводника обогащаются основными носителями заряда и сопротивление граничного слоя уменьшается по сравнению с нейтральными слоями. Суммарное сопротивление системы будет близко к сопротивлению нейтрального слоя полупроводника

и не будет зависеть от внешнего напряжения и его полярности. Такие невыпрямляющие переходы являются основой омических контактов.

Электронно-дырочный переход

На рис. 3-10 показана структура контакта двух полупроводников. Концентрация электронов n_n в полупроводнике n -типа много больше концентрации электронов p_p в полупроводнике p -типа, а концентрация дырок p_p в полупроводнике p -типа много больше концентрации дырок n_n в полупроводнике n -типа. Наличие градиента концентраций на границе двух полупроводников создает диффузию электронов из слоя n в слой p , а дырок из слоя p в слой n . Диффузия основных носителей приводит к тому, что в приконтактной зоне полупроводника n -типа образуется нескомпенсированный положительный заряд ионов донорной примеси, а в полупроводнике p -типа — нескомпенсированный отрицательный заряд ионов акцепторной примеси.

Таким образом, в приконтактной зоне полупроводников различного типа образуется двойной электрический слой, который имеет малую концентрацию подвижных носителей заряда и обладает поэтому большим сопротивлением. График распределения плотности пространственного заряда в идеализированном виде приведен на рис. 3-10, г. На внешней границе и в глубине полупроводников заряд равен нулю, а в приконтактных зонах полупроводников n - и p -типа определяется соответственно концентрация атомов донорной N_d и акцепторной N_a примеси.

Двойной электрический слой, образующийся на границе электронного и дырочного полупроводников в результате диффузии основных носителей, называется электронно-дырочным переходом (p - n переходом).

Протяженность двойного электрического слоя характеризуется толщиной p - n перехода D_0 (рис. 3-10, д).

В зоне p - n перехода существует электрическое поле, напряженность которого направлена от полупроводника n -типа к полупроводнику p -типа. Это поле препятствует процессу диффузии основных носителей и вызывает дрейф неосновных носителей. На рис. 3-10, е приведены графики потенциальных энергий дырок и электронов. В глубине дырочного полупроводника потенциальная энергия дырок W_p равна некоторому постоянному значению, а при приближении к зоне p - n перехода энергия W_p начинает расти за счет потенциальной энергии электрического поля p - n перехода. В глубине слоя n -типа потенциальная энергия дырок максимальна и превосходит эту энергию в полупроводнике p -типа на $e\varphi_n$, обусловленную потенциальной энергией двойного электрического слоя. Для того чтобы дырки могли перейти из слоя p -типа в слой n -типа, они должны обладать энергией, достаточной для преодоления потен-

циального барьера, высота которого $\Delta W_p = e\phi_k$. Величина ϕ_k называется контактной разностью потенциалов.

Потенциальная энергия электронов в слое n -типа равна некоторому постоянному значению, а при приближении к p - n переходу начинает расти. В полупроводнике p -типа эта энергия максимальна и превосходит энергию электронов области полу-

проводника n -типа на $e\phi_k$. Для перехода электронов из полупроводника n -типа в полупроводник p -типа необходимо преодолеть потенциальный барьер, высота которого $\Delta W_n = e\phi_k$ обусловлена потенциальной энергией поля. При переходе неосновных носителей (дырок в слое n -типа и электронов в слое p -типа) из одной области в другую происходит не преодоление потенциального барьера, а как бы «скатывание» с него.

Гальваномагнитные явления

Гальваномагнитными называют явления, возникающие под действием магнитного поля в проводниках и полупроводниках с электрическим током. Техническое применение получили три гальваномагнитных явления: эффект Холла, магниторезистивный и магнитодиодный эффекты. Первые два обусловлены действием магнитного поля на равновесные носители заряда, а последний — на неравновесные носители заряда (в полупроводнике).

Эффект Холла проявляется в возникновении электрического поля с напряженностью $E = RJ \times B$, перпендикулярной вектором магнитной индукции B и плотности тока J . Коэффициент (или постоянная) Холла R может быть положительным и отрицательным и даже изменять знак с изменением температуры. Эффект Холла является следствием того, что на заряженную частицу (электрон и дырку), перемещающуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца, пропорциональная векторному произведению скорости частицы на магнитную индукцию. Под влиянием этой силы движущиеся в направлении электрического поля, созданного в образце внешними источниками тока, носители заряда отклоняются в поперечном направлении.

В ферромагнетиках на электроны кроме внешнего поля с напряженностью H действует поле доменов, определяющее намагниченность M образца. При этом наблюдается особый, ферромагнитный эффект Холла. Экспериментально найдено, что напряженность поперечного электрического поля (в направлении оси y)

$$E = (R_0 H + R_s M) J,$$

где J — плотность тока (в направлении оси x); R_0 — обыкновенный коэффициент Холла; R_s — так называемый спонтанный, или ферромагнитный, коэффициент Холла. С повышением температуры коэффициент R_s возрастает, достигая максимума в точке Кюри, а затем снижается. Для большинства неферромагнитных металлов коэффициенты Холла почти не зависят от температуры.

Гальваномагнитные эффекты очень чувствительны ко всякого рода примесям и неоднородностям. Поэтому приведенные в табл. 3-1 значения коэффициента Холла на-

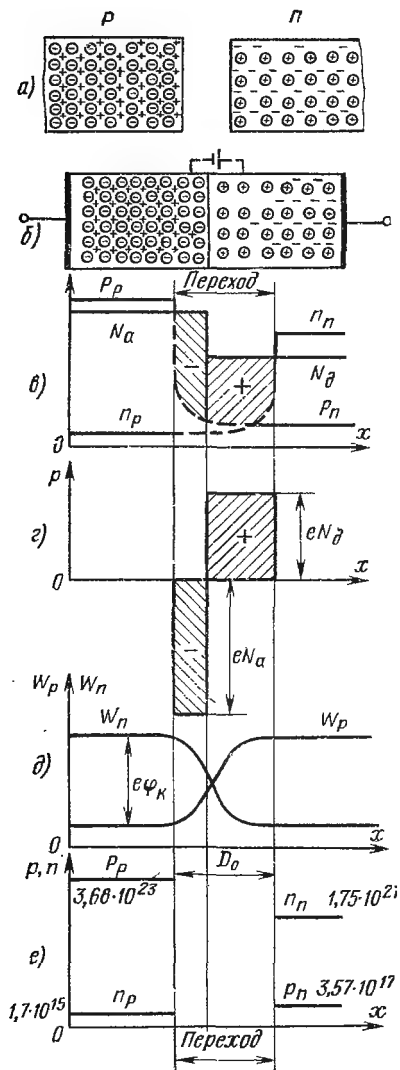


Рис. 3-10. Структура электронно-дырочного перехода в состоянии термодинамического равновесия. а — распределение носителей заряда в полупроводниках p - и n -типов до образования контакта; б — то же в условиях контакта, но при отсутствии внешнего поля; в — распределение концентраций акцепторной и донорной примеси, а также концентраций основных и неосновных носителей заряда; г — распределение плотности пространственного заряда; д — изменение потенциальных энергий электронов W_n и дырок W_p ; е — распределение концентраций основных и неосновных носителей заряда.

Таблица 3-1

Коэффициенты Холла для металлов
(вблизи комнатной температуры)

Метал- лы	$R_H, 10^{-10}$ м ² /Кл	Метал- лы	$R_H, 10^{-10}$ м ² /Кл
Na	-2,1	W	+1,18
Mg	-0,83	Pt	-1,27
K	-4,2	Au	-0,705
Cu	-0,536	Hg	-0,76
Mo	+1,80	As	+45,2
Sn	-0,022		

до рассматривать лишь как наиболее вероятные.

В полупроводниках дрейфующие в электрическом поле электроны и дырки отклоняются магнитным полем к одной и той же грани образца. У этой грани происходит их накопление до тех пор, пока созданное ими «поле Холла» и возникающий градиент концентрации носителей заряда не скомпенсируют силу Лоренца.

В полупроводнике с одним типом электропроводности сила Лоренца полностью компенсируется полем Холла. В итоге на боковых гранях образца возникает разность потенциалов, а носители заряда, движущиеся со средней скоростью дрейфа, не отклоняются от направления внешнего электрического поля. В полупроводнике с двумя типами носителей заряда поле Холла меньше и компенсирует силу Лоренца для каждого из типов носителей заряда не полностью. Поэтому их движение несколько отклоняется от направления внешнего электрического поля.

Помимо коэффициента Холла для характеристики этого эффекта используются «холловская подвижность» $\mu_H = |R_H|$ и «угол Холла», на который отклонились бы носители в данном магнитном поле при отсутствии поля Холла: $\theta \approx \mu B$ (μ — обычная подвижность носителя заряда и σ — удельная электрическая проводимость).

Магнитоинерционный эффект, называемый также эффектом Гаусса, заключается в изменении электрического сопротивления под воздействием магнитного поля. Он обусловлен уменьшением пути, проходимого носителями заряда между актами рассеяния при наличии магнитного поля и поперечной составляющей силы Лоренца. Дело в том, что даже при наличии поля Холла и в примесном полупроводнике вследствие теплового движения всегда есть носители заряда, движущиеся со скоростями, как большими, так и меньшими средней скорости дрейфа во внешнем электрическом поле. Таким образом, направление движения практически всех носителей заряда в магнитном поле не совпадает с направлением внешнего электрического поля. Магнитоинерционный эффект считается положительным, если при появлении магнитного поля сопротивление возрастает. Отрицательный эффект (уменьшение сопротивления) обычно наблюдается при низких температурах и

пока не используется для создания гальваномангнитных приборов. У большинства полупроводников и металлов (за исключением ферромагнитных) сопротивление с ростом напряженности магнитного поля возрастает.

При обычно используемых магнитных индукциях $B \ll 10$ Тл и комнатной температуре «магнитосопротивление» $\Delta\rho/\rho_0$ ($\Delta\rho$ — изменение сопротивления в магнитном поле, ρ_0 — сопротивление при $B=0$) для большинства металлов весьма мало. Например, для меди $\Delta\rho/\rho_0 = 10^{-4}$ при $B=2$ Тл. Исключением является висмут, у которого $\Delta\rho/\rho_0 \approx 2$ при $B=3,1$ Тл. В полупроводниках этот эффект значительно больше, чем в металлах. Например, в германии при 100 К и $B=2$ Тл $\Delta\rho/\rho_0 \approx 3$.

Зависимость магнитосопротивления от магнитной индукции в полупроводниках близка к квадратичной. Это сопротивление тем больше, чем больше подвижность носителей заряда:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \approx \frac{\Delta\mu}{\mu_0} \approx A (\mu B)^2,$$

где A — коэффициент.

Магнитоинерционный эффект зависит от угла между направлениями магнитной индукции и плотности тока. Максимум наблюдается, когда эти направления перпендикулярны, а минимум — при совпадении этих направлений.

Магнитоинерционный эффект называется явление резкого возрастания сопротивления диода в прямом направлении под воздействием поперечного магнитного поля.

Наиболее отчетливо этот эффект проявляется при несимметричном p - n переходе и удлиненной базе, т. е. когда концентрация равновесных носителей заряда, например, в p -области много больше, чем в n -области, и расстояние между p - n переходом и вторым контактом значительно превышает длину диффузионного смещения. Тогда прямой ток очень сильно зависит от отношения толщины базовой области d к длине диффузионного смещения L и практически все напряжение при прямом смещении приходится на базу; напряжение на p - n переходе составляет малую его долю.

Резкое возрастание сопротивления такого диода после появления поперечного магнитного поля обусловлено совместным действием трех явлений. Во-первых, уменьшается подвижность носителей заряда. Влияние магнитного поля особенно значительно на неосновные носители заряда, благодаря тому, что поле Холла, созданное основными носителями, усиливает искривление траектории дрейфа неосновных носителей заряда. Во-вторых, уменьшается их диффузионная длина (средний путь диффундирующего носителя за среднее время жизни). В-третьих, уменьшается инжекция дырок из p - n перехода вследствие увеличения сопротивления базы и дальнейшего уменьшения напряжения на p - n переходе.

Магнитооптические явления

Магнитооптическими называют явления, в которых проявляется влияние магнитного поля на излучение и распространение света. К ним, в частности, относятся эффекты Фарадея, Коттона—Мутона, Керра и циклотронный резонанс.

Эффектом Фарадея называется поворот плоскости поляризации света, прошедшего сквозь среду, находящуюся во внешнем магнитном поле. Поворот плоскости поляризации возникает вследствие различия фазовых скоростей циркулярно-поляризованных волн с правым и левым вращением, на которые распадается линейно-поляризованная волна в гиротропной среде. В общем случае угол удельного (на единицу длины) поворота плоскости поляризации

$$F = \frac{\pi}{\lambda} (n'_- - n'_+),$$

где λ — длина волны; n'_+ и n'_- — вещественные компоненты показателей преломления для право- и левополяризованных волн.

В ферромагнитных материалах для света, распространяющегося вдоль направления намагниченности насыщения M_s , удельное фарадеевское вращение плоскости поляризации

$$F = KM_s,$$

где K — постоянная Кундта; F считается положительным, если при распространении света вдоль направления магнитного поля плоскость поляризации вращается по часовой стрелке.

Добротность или «качество» магнитооптических сред оценивается отношением $2F/\alpha$, где α — коэффициент поглощения в законе ослабления интенсивности света $I = I_0 \exp(-\alpha l)$. Параметры некоторых ферромагнитных материалов при температуре 300 К приведены в табл. 3-2 [3-6].

Эффект Фарадея в полупроводниках обусловлен поляризацией как связанных, так и свободных электронов.

Таблица 3-2

Магнитооптические характеристики веществ

Вещество	M_s , кА/м	λ , нм	F , о/м	α , м ⁻¹	$2F/\alpha$
Fe	1730	546	$3,5 \cdot 10^7$	$7,6 \cdot 10^7$	0,92°
Co	1444	546	$3,6 \cdot 10^7$	$8,5 \cdot 10^7$	0,85
Ni	508	546	$0,99 \cdot 10^7$	$8,0 \cdot 10^7$	0,25
Пермаллой	848	500	$1,2 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$	0,4
Ni:Fe (82:18%)	611	450	$4,2 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^7$	1,4
MnBi	198	1200	$2,5 \cdot 10^4$	6,9	7000
YIG					

Эффектом Коттона—Мутона (или Фохта) называют двойное лучепреломление света, распространяющегося перпендикулярно к направлению магнитного поля. При этом линейно-поляризованная волна пре-

образуется в общем случае в эллиптически-поляризованную волну. Эффект возникает вследствие различия фазовых скоростей обыкновенной и необыкновенной волн, на которые распадается линейно-поляризованная волна в поперечно-намагнитенной среде.

Магнитооптический эффект Керра проявляется во влиянии намагниченности ферромагнитного материала на поляризацию отраженного от его поверхности света. Как и эффект Фарадея, он обусловлен различием показателей преломления намагниченной среды для право- и левополяризованных волн. В зависимости от взаимной ориентации плоскости падения света и намагниченности различают три разновидности магнитооптического эффекта Керра. «Полярный» эффект возникает, когда вектор намагниченности перпендикулярен к отражающей поверхности; в «меридиональном» (продольном) эффекте вектор намагниченности параллелен как отражающей поверхности, так и плоскости падения; при «экваториальном» (поперечном) эффекте вектор намагниченности параллелен отражающей поверхности, но перпендикулярен плоскости падения.

Циклотронным эффектом называют тенденцию носителей заряда закручиваться в спираль вокруг направления магнитного поля с угловой частотой $\omega_c = eB/m$, называемой циклотронной, при которой поглощение света достигает максимума, а ширина резонансной кривой равна частоте соударений $\nu_i = 1/\theta_i$, т. е. позволяют определить время свободного пробега θ_i .

Внутренний фотоэффект

Внутренним фотоэффектом называют явления, происходящие внутри кристаллической решетки при воздействии светового потока и приводящие к перераспределению электронов по энергетическим состояниям и изменению электрических свойств освещаемого образца — его проводимости и внутреннего электрического поля. В отличие от внешнего фотоэффекта, заключающегося в эмиссии электронов, при внутреннем фотоэффекте происходит изменение только энергетического состояния электронов, приводящее к изменению концентрации свободных носителей заряда или их подвижности, а также к перераспределению их внутри кристалла. Если внешний фотоэффект наблюдается при освещении любых веществ, то внутренний фотоэффект характерен только для полупроводников и диэлектриков.

В случае внутреннего фотоэффекта первичным процессом является световая инжекция избыточных носителей заряда. Образование неравновесных носителей здесь происходит при поглощении энергии световых квантов. Этот процесс зависит как от внешних факторов (интенсивности и длины световой волны), так и от внутренних (геометрии образца, коэффициента поглощения, диффузии и рекомбинации).

В зависимости от способа наблюдения внутреннего фотоэффекта он может приводить к вторичным явлениям самого различного характера. Так, в отсутствии внешних полей неравномерное освещение однородного полупроводника приводит к возникновению электрического поля, связанного с *кристалл-фотоэффектом*.

Если на пластинку полупроводника падает свет, то между освещенной и параллельной ей неосвещенной поверхностью возникает ЭДС. Появление ЭДС может быть связано со значительным диффузионным током избыточных носителей заряда, вызывающим падение напряжения на образце. Однако ЭДС возникает и в случае тонкой пластинки, когда диффузией можно пренебречь. При этом фото-ЭДС будет обусловлена разностью между квазиуровнями Ферми на передней (освещенной) и задней поверхностях. Возникновение разности потенциалов между освещенной и затемненной частями однородного полупроводника может происходить и в результате биполярной диффузии носителей заряда с разными подвижностями. Фотодиффузионную разность потенциалов иногда называют ЭДС Дембера.

При наблюдении внутреннего фотоэффекта в магнитном поле обнаруживается *фотомагнитоэлектрический эффект* (эффект Киконна — Носкова). Он заключается в возникновении электрического поля, направленного перпендикулярно световому потоку и магнитному полю в полупроводнике. Это электрическое поле образуется в результате отклонения магнитным полем диффузионного тока фотоэлектронов и фотодырок, образующихся вблизи освещенной поверхности. Поэтому фотомагнитный эффект можно рассматривать как эффект Холла на фотодиффузионном токе. Прямая пропорциональность фотомагнитного эффекта интенсивности освещения и напряженности магнитного поля (при небольших освещенностях и магнитных полях) дает возможность создать на его основе приемники инфракрасного излучения и магнетометры.

При наблюдении внутреннего фотоэффекта во внешнем электрическом поле обнаруживается *фоторезистивный эффект*. Он заключается в изменении электрической проводимости полупроводника под действием освещения. Изменение проводимости происходит в результате появления неравновесных носителей (Δn , Δp), возникающих при поглощении фотонов. При этом прирост проводимости $\Delta \sigma = e(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p)$.

Люминесценция

Люминесценцией называют явление поглощения веществом энергии с последующим электромагнитным излучением в видимой области спектра или близкой к ней. Точнее, люминесценцию определяют как избыток над тепловым излучением тела в данной спектральной области, если этот избыток обладает длительностью, значительно

превышающей период световых колебаний. В зависимости от способов возбуждения люминесценции различают: фотолюминесценцию (за счет поглощения энергии света), электролюминесценцию (при поглощении электрической энергии), катодолюминесценцию (при бомбардировке электронами), рентгенолюминесценцию (от рентгеновского излучения), радиолюминесценцию (от гамма-лучей), триболлюминесценцию (при механическом воздействии), хеми- и биоллюминесценцию (при химических и биологических процессах). Если люминесценция происходит во время возбуждения, то ее называют *флюоресценцией*; если она продолжается некоторое время после окончания возбуждения — *фосфоресценцией*.

Различие между видами люминесценции связано с процессом поглощения энергии, а не с тем, как она превращается в световую. Известны два основных типа люминесцентного излучения. Согласно одному из них, излучение фотона происходит в акте рекомбинации пары электрон — дырка. Подобные процессы происходят, в частности, при инжекции неосновных носителей вблизи *p-n* перехода. Такое излучение наблюдается в кристаллах CdS, SiC, Ge, Si и некоторых полупроводниковых соединений $Al^{III}B^V$. Второй, нерекombинационный механизм связан с переходом люминесцентного центра из возбужденного состояния в основное. Процессы такого рода наблюдаются в фосфоре и сульфиде цинка ($ZnS-Cu, Mn$). Возбуждение происходит здесь при столкновении с электроном, разогнанным сильным локальным электрическим полем.

Электролюминесцентные ячейки используются в области освещения, индикации и системах обработки информации, в частности в оптоэлектронике. Параметры отечественных электролюминофоров приведены в табл. 3-3 [3-7].

Таблица 3-3

Характеристики электролюминофоров

Марка	Состав	Цвет свечения	Длина волны в максимуме излучения, нм	Яркость свечения, кд/м ²	
				начальная	через 2000 ч
ЭЛ-455С	ZnS—Cu	Синий	455	20	6
ЭЛ-455	ZnS—Cu	Голубой	455	20	6
ЭЛ-510М	ZnS—Cu, Al	Зеленый	510	60	15
ЭЛ-515	ZnS—Cu	Зеленый	515	70	18
ЭЛ-580М	ZnS—Cu, Mn	Желтый	580	20	7

Примечание. Данные по яркости свечения приведены для электролюминоцентных конденсаторов, изготовленных с применением эпоксидного лака ЭП-96, при толщине электролюминоцентного слоя 60 мкм, напряжении 220 В и частоте 400 Гц.

3-2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Поляризация диэлектриков

Основными электрическими процессами, возникающими в диэлектриках под воздействием приложенного напряжения, являются процессы поляризации, электропроводности и пробоя диэлектриков.

Поляризация представляет собой обратимое смещение электрически заряженных частиц, входящих в состав диэлектриков. Различают следующие основные виды поляризации: электронная, ионная, дипольная, спонтанная и некоторые другие.

Процесс поляризации диэлектриков описывается уравнением Клаузиуса — Мосотти

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{n_0 \alpha}{3\epsilon_0} = P,$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость электроизоляционного материала; n_0 — число частиц (молекул, ионов) в 1 м^3 материала; $\alpha = \alpha_0 + \alpha_n + \alpha_d$ — поляризуемость частицы (молекула, ион); α_0 — электронная поляризуемость; α_n — ионная поляризуемость; α_d — дипольная поляризуемость; P — поляризованность диэлектрика; ϵ_0 — электрическая постоянная.

Уравнение Клаузиуса — Мосотти устанавливает связь между практической характеристикой материала — относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r , физической постоянной материала α и числом поляризующихся частиц в единице объема диэлектрика n_0 .

Электронная поляризация представляет собой процесс упругого смещения электронов (электронных орбит) относительно ядра во всех атомах диэлектрика. Процесс электронной поляризации происходит за время 10^{-15} — 10^{-16} с. Электронная поляризация имеет место во всех диэлектриках.

Электронная поляризуемость α_0 зависит от структуры частицы. Чем больше радиус молекулы или иона, тем больше α_0 и ϵ_r данного диэлектрика. В пропорциональной зависимости от числа частиц n_0 в единице объема диэлектрика находится и ϵ_r . С нагреванием, когда плотность диэлектрика уменьшается, наблюдается уменьшение ϵ_r неполярного диэлектрика.

У диэлектриков с чисто электронной поляризацией ϵ_r численно равна квадрату показателя преломления света.

Ионная поляризация представляет собой упругое смещение под действием электрического поля ионов относительно центров их равновесия. Поляризация ионного смещения происходит за время, сравнимое со временем собственных колебаний ионов, и составляет 10^{-13} — 10^{-14} с.

Интенсивность процесса ионной поляризации в уравнении Клаузиуса — Мосотти

$$\alpha_n = 2e^2/b,$$

где e — заряд иона; b — коэффициент упругой связи между ионами.

С повышением температуры ионного диэлектрика α_n возрастает в связи с ослаблением упругих сил в ионном диэлектрике и увеличением амплитуды колебаний иона. Поэтому интенсивность процесса ионной поляризации возрастает с повышением температуры. В ионных диэлектриках одновременно с поляризацией ионного смещения развивается также процесс электронной поляризации. Эффект поляризации у большинства ионных диэлектриков возрастает с повышением их температуры.

Электронная и ионная поляризации представляют собой виды деформационной поляризации, не вызывающие потерь энергии в диэлектриках. Процессы поляризации, вызывающие затраты энергии, относятся к релаксационным видам поляризации.

Дипольная поляризация протекает в полярных диэлектриках под действием электрического поля. Этот вид поляризации представляет собой ориентацию — поворот полярных молекул в направлении действующего электрического поля.

Поляризуемость полярных молекул

$$\alpha_d = \mu^2/3kT,$$

где μ — начальный электрический момент полярной молекулы; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

При повышении температуры диэлектрика интенсивность дипольной поляризации возрастает в связи с ослаблением межмолекулярных сил и понижением коэффициента внутреннего трения. Поэтому с повышением температуры вначале ϵ_r полярных диэлектриков увеличивается (рис. 3-11). С дальнейшим ростом температуры интенсивность хаотического теплового движения полярных молекул начинает преобладать над ориентирующим действием электрического поля и эффект дипольной поляризации понижается. Это в свою очередь вызывает уменьшение ϵ_r полярных диэлектриков.

Для ориентации полярных молекул в процессе дипольной поляризации требуются промежутки времени, значительно большие по сравнению со временем для процессов деформационных поляризаций. Естественно, диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков в сильной степени зависит от частоты электрического поля (рис. 3-11). При низких частотах полярные молекулы успевают совершить свой поворот за время одного полуцикла переменного напряжения. При этом ϵ_r практически равна ϵ_r при постоянном напряжении. С дальнейшим ростом частоты время одного полуцикла сокращается и ряд полярных молекул выпадает из процесса дипольной поляризации. При этом относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r диэлектрика снижается, достигая (при очень больших частотах) значения $\epsilon_{r\infty}$, обусловленного только электронной поляризацией диэлектрика.

Критическая частота f_0 , при которой начинается резкое снижение эффекта дипольной поляризации, может быть определена по формуле

$$f_0 = kT/8\pi^2\eta r^3,$$

где r — эквивалентный радиус полярной молекулы; η — динамическая вязкость; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Дипольная поляризация ярко выражена у полярных газов и жидкостей (касторовое масло, совол и др.). В твердых полярных

энергия рассеивается в полярных диэлектриках в виде тепла, которое вызывает нагрев последних. Потери энергии в диэлектриках, работающих в переменном поле, оцениваются тангенсом угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r},$$

где γ — удельная проводимость; ω — угловая частота; ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

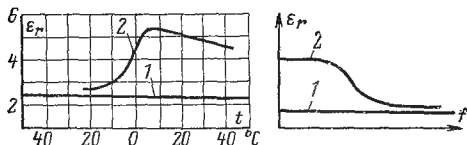


Рис. 3-11. Зависимость ϵ от температуры t , частоты f для электроизоляционных жидкостей.

1 — неполярная жидкость; 2 — полярная жидкость.

диэлектриках дипольная поляризация представляет собой не ориентацию самих полярных молекул, а поворот имеющихся в молекулах полярных радикалов, например гидроксильных групп в молекулах целлюлозы, бакелита и др. Этот вид дипольной поляризации иногда называется структурной поляризацией.

Значения относительной диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков зависят от размеров полярных молекул и величины их начального электрического момента. Чем меньше размер полярной молекулы — диполя и больше ее начальный электрический момент μ , тем больше ϵ_r данного диэлектрика. У полярных диэлектриков одновременно имеют место дипольная и электронная поляризации. Вследствие этого суммарный эффект поляризации полярных диэлектриков, а следовательно, и их относительные диэлектрические проницаемости намного выше, чем у неполярных диэлектриков (табл. 3-4).

Таблица 3-4

Неполярные диэлектрики		Полярные диэлектрики	
Название	ϵ_r при 20 °C	Название	ϵ_r при 20 °C
Четыреххлористый углерод	2,23	Касторовое масло	4,5—4,8
Бензол	2,218	Совол	5,0—5,2
Парафин	2,0—2,2	Бакелит	4,6
Полиэтилен	1,9—2,0	Галавакс	5,0
Рафтортил		Глифтал	8,0

Дипольная поляризация вызывает потери энергии в диэлектрике, так как электрическое поле затрачивает энергию на поворот полярных молекул (диполей). Эта

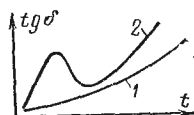


Рис. 3-12. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты f для электроизоляционных жидкостей.

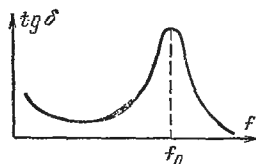


Рис. 3-13. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты f для полярной электроизоляционной жидкости.

На рис. 3-12 показаны зависимости этой характеристики от температуры для неполярной (1) и полярной (2) жидкостей.

У тщательно очищенных неполярных диэлектриков диэлектрические потери обусловлены преимущественно токами проводимости, которые возрастают с повышением температуры диэлектрика. В связи с этим возрастает и $\operatorname{tg} \delta$. У полярных диэлектриков наблюдается максимум $\operatorname{tg} \delta$ при такой вязкости диэлектрика, когда в процессе дипольной поляризации принимает участие наибольшее количество полярных молекул. Понижение $\operatorname{tg} \delta$ с дальнейшим повышением температуры обусловлено ростом интенсивности беспорядочного теплового движения полярных молекул. Вторичный подъем $\operatorname{tg} \delta$ вызван увеличением тока проводимости в диэлектрике.

Максимум $\operatorname{tg} \delta$ на рис. 3-13 соответствует частоте, при которой начинается снижение ϵ_r . Это объясняется тем, что большинство полярных молекул при этой частоте выходит из процесса дипольной поляризации.

Еще один вид релаксационной поляризации наблюдается в неорганических стеклах, а также в ионных кристаллических диэлектриках с неплотной упаковкой ионов (муллит в фарфоре и др.). В этих диэлектриках слабо связанные ионы, находящиеся в состоянии хаотических тепловых колеба-

ний, перебрасываются электрическим полем. Этот процесс получил название миграционной поляризации. Переброс слабо связанных ионов вызывает дополнительные потери энергии.

Спонтанная (самопроизвольная поляризация) представляет собой процесс самопроизвольной ориентации диполей, наблюдаемой внутри отдельных областей (доменов) диэлектрика в отсутствие электрического

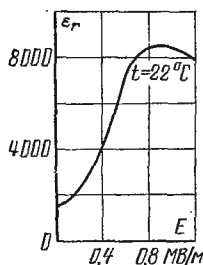


Рис. 3-14. Зависимость ϵ_r сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля.

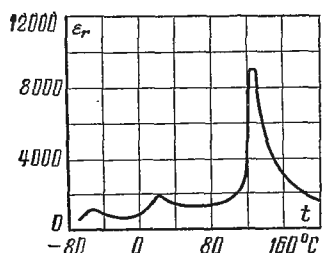


Рис. 3-15. Зависимость ϵ_r сегнетоэлектрика (BaTiO_3) от температуры.

поля. Спонтанная поляризация имеет место у материалов, называемых сегнетоэлектриками.

В отсутствие электрического поля электрические моменты отдельных областей (доменов) диэлектрика направлены беспорядочно, но они взаимно уравновешивают друг друга. Воздействие на диэлектрик электрического поля вызывает ориентацию диполей и направлении поля (доменную поляризацию). При этом наблюдается сильный рост относительной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Этот процесс продолжается до определенной напряженности электрического поля, а затем наступает насыщение (рис. 3-14). Дальнейшее повышение напряженности не увеличивает поляризованности, и рост ϵ_r прекращается. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков имеет также ярко выраженный максимум при вполне определенной температуре (рис. 3-15). Эта температура называется сегнетоэлектрической точкой Кюри (θ_c). Наличие спонтанной поляризации обуславливает аномально большие значения

ϵ_r у сегнетоэлектриков (сегнетовая соль, титанат бария и др.). Процесс доменной поляризации сопровождается затратой энергии, рассеиваемой в диэлектриках в виде тепла.

Электропроводность диэлектриков

Все диэлектрики при ненулевой температуре, хотя и в незначительной степени, обладают электропроводностью (см. § 3-1).

В отличие от проводников у диэлектриков наблюдается изменение тока со временем (рис. 3-16) вследствие спадающего тока абсорбции. Последний обусловлен наличием релаксационных поляризаций в диэлектрике. С некоторого момента под воздействием постоянного напряжения в диэлектрике устанавливается только сквозной

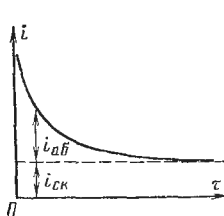


Рис. 3-16. Зависимость тока в диэлектрике от времени.



Рис. 3-17. Зависимость удельной проводимости жидкого диэлектрика от температуры.

ток проводимости. Последний определяет проводимость диэлектрика.

В газообразных диэлектриках ток проводимости обусловлен направленным перемещением электронов, а также положительных и отрицательных ионов (см. § 3-5).

В жидких диэлектриках ток проводимости создается ионами и электрически заряженными коллоидными частицами (молионы). Источником ионов являются различные примеси в диэлектрике: вода, органические кислоты и т. п. В полярных электроизоляционных жидкостях на ионы могут диссоциировать молекулы самого жидкого диэлектрика. Проводимость полярных электроизоляционных жидкостей всегда несколько выше проводимости неполярных жидких диэлектриков.

В электроизоляционных технических жидкостях наблюдается также молионная или электрофоретическая (электрофорез) электропроводность. В этом случае ток проводимости обусловлен направленным перемещением электрически заряженных коллоидных частиц различных примесей: воды, смолистых веществ и др. Коллоидные частицы различных загрязнений перемещаются в электроизоляционной жидкости под действием электрического поля. С повышением температуры жидкого диэлектрика его вязкость падает и направленное перемещение ионов и молионов облегчается. Проводи-

мость жидких диэлектриков изменяется (рис. 3-17) по экспоненциальному закону

$$\gamma = \gamma_0 e^{-AT},$$

где γ_0 и A — постоянные величины, зависящие от состава жидкого диэлектрика; T — абсолютная температура.

С ростом напряжения, приложенного к жидкому диэлектрику, изменение тока проводимости (рис. 3-18) носит приблизительно такой же характер, как и у газообразных диэлектриков. В тщательно очищенных электроизоляционных жидкостях отчетливо

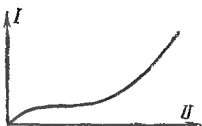


Рис. 3-18. Зависимость тока от напряжения в жидком диэлектрике.

наблюдается область насыщения. Понижение проводимости жидких диэлектриков достигается их тщательной очисткой (фильтрование, сушка, обработка адсорбентами и др.).

В твердых диэлектриках проводимость складывается из ионной и электронной проводимостей, причем электронная проводимость, как правило, наблюдается в сильных электрических полях.

Ток проводимости в твердых диэлектриках обуславливается направленным перемещением ионов примесей и ионов самого диэлектрика. В диэлектриках с атомными и молекулярными решетками ток проводимости обусловлен только ионами различных примесей. У таких диэлектриков (парафин, полиэтилен, политетрафторэтилен и др.) проводимость весьма мала и они обладают большими удельными объемными и поверхностным сопротивлениями: $\rho_v = 10^{15} \div 10^{17}$ Ом·м; $\rho_s = 10^{13} \div 10^{15}$ Ом. Такими же большими удельными сопротивлениями обладают высокополимерные аморфные диэлектрики, например полистирол, полипропилен, у которых ток проводимости обусловлен преимущественно ионами примесей.

С течением времени прохождения тока ионная проводимость твердого диэлектрика понижается в связи с уменьшением количества ионов примесей, которые, дойдя до электродов, нейтрализуют свои заряды. В ионных кристаллических диэлектриках (слюда и др.) ток проводимости определяется не только ионами примесей, но ионами самой кристаллической решетки. Последние могут быть освобождены электрическим полем от мест, где они были слабо закреплены (междуузлия), а также из узлов кристаллической решетки при одновременном воздействии на нее электрического поля и высокой температуры.

В аморфных диэлектриках (неорганические стекла) ионная электропроводность обусловлена электролизом различных окис-

лов, входящих в состав самих стекол. Особенно сильно повышается проводимость стекол при содержании в них окислов одновалентных металлов (Na_2O ; K_2O и др.). Введение же окислов двухвалентных металлов (BaO ; CaO и др.) приводит к снижению проводимости в стеклах.

Проводимость стекол и других твердых диэлектриков существенно зависит от температуры:

$$\gamma = A e^{-B/T},$$

где A и B — постоянные, зависящие от состава и структуры твердого диэлектрика; T — абсолютная температура, К.

Проводимость твердых кристаллических диэлектриков с ионными связями хорошо описывается двучленной формулой

$$\gamma = \gamma_1 e^{-B_1/T} + \gamma_2 e^{-B_2/T}.$$

Первый член этой формулы исчезающе мал при низких температурах, а второй — исчезающе мал при высоких температурах.

В ионных кристаллических диэлектриках ток проводимости обусловлен перемещением ионов одного знака. Так, в кристалле NaCl под действием электрического поля движутся только положительно заряженные ионы натрия. При высоких температурах в токе проводимости принимают участие и ионы другого знака.

В области сильных электрических полей в твердых диэлектриках наблюдается также электронная проводимость, которая изменяется согласно выражению

$$\gamma = \gamma_n e^{bE},$$

где γ_n — проводимость в конце области насыщения; b — коэффициент, зависящий от температуры.

В области очень сильных электрических полей (предпробойная область) проводимость твердых кристаллических диэлектриков более точно описывается формулой Я. И. Френкеля

$$\gamma = \gamma_n e^{-\frac{1}{kT} \sqrt{\frac{e^2 E}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r}}},$$

где k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала; E — напряженность электрического поля.

При высоких температурах может наблюдаться также вхождение электронов в твердый диэлектрик с поверхности металлических электродов.

Пробой диэлектриков

При напряженности электрического поля, превосходящей предел электрической прочности диэлектрика, наступает пробой. Пробой представляет собой процесс разрушения диэлектрика, в результате чего диэлектрик теряет электроизоляционные свойства в месте пробоя.

Напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называют пробивным напряжением $U_{пр}$, а соответствующее значение напряженности электрического поля называется электрической прочностью диэлектрика $E_{пр}$.

Для равномерного электрического поля электрическая прочность диэлектрика определяется по формуле

$$E_{пр} = U_{пр}/d,$$

где d — толщина диэлектрика в месте пробоя.

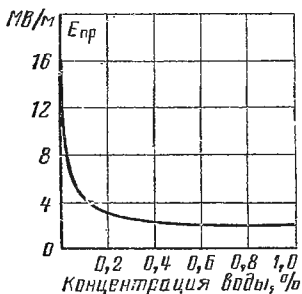


Рис. 3-19. Изменение электрической прочности трансформаторного масла от содержания в нем воды.

Пробой жидких диэлектриков — явление сложное, что объясняется сложным составом жидких диэлектриков и сильным влиянием загрязнений на развитие пробоя. На рис. 3-19 показана зависимость изменения электрической прочности трансформаторного масла от содержания влаги. Наиболее резкое снижение электрической прочности жидких диэлектриков вызывает эмульсионная вода. С повышением температуры эмульсионная вода переходит в растворенную; при этом жидкий диэлектрик становится более однородным и электрическая прочность его повышается.

Другие загрязнения (волокна, смолистые вещества и др.) также понижают электрическую прочность жидких диэлектриков. Чистота поверхности электродов оказывает существенное влияние на электрическую прочность жидких диэлектриков.

Большая продолжительность воздействия электрического поля на жидкий диэлектрик вызывает резкое снижение пробивного напряжения (рис. 3-20).

Конфигурация электрического поля и полярность электродов также вызывают изменение пробивных напряжений жидких диэлектриков (см. § 9-3).

Пробивное напряжение жидких диэлектриков повышается с увеличением давления (рис. 3-21). Зависимость пробивного напряжения от давления заметно уменьшается с повышением степени очистки электроизоляционных жидкостей. При импульсных воздействиях напряжения на слой жидкого диэлектрика зависимости пробивного напряжения от давления практически не

наблюдается. С увеличением плотности жидкого диэлектрика его электрическая прочность линейно возрастает.

Влияние температуры на пробивные напряжения жидких диэлектриков различно в зависимости от химического состава и степени загрязнения примесями. Заметные изменения электрической прочности с температурой наблюдаются у электроизоляционных жидкостей сложного химического состава, особенно при наличии в них загрязнений (влага, газы и др.). По мере приближения к температуре кипения электрическая



Рис. 3-20. Зависимость пробивного напряжения жидкого диэлектрика от времени воздействия на него электрического поля.

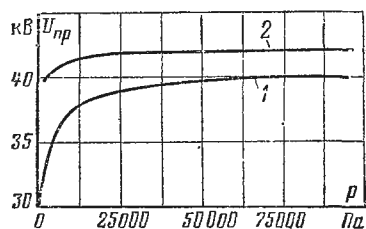


Рис. 3-21. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления при 50 Гц.

1 — невакуумированное масло; 2 — вакуумированное масло.

прочность жидких диэлектриков резко понижается.

Наибольший практический интерес представляют теории, посвященные процессам пробоя технических электроизоляционных жидкостей. В большинстве этих теорий (авторы Н. Н. Семенов и А. Ф. Вальтер, Эдлер и др.) пробой жидких диэлектриков рассматривается как тепловой процесс, в результате которого в слое жидкого диэлектрика образуются газовые или паровые каналы. Паровая и газовая фазы в жидком диэлектрике возникают при нагреве его токами проводимости, повышенные значения которых наблюдаются в наиболее загрязненных частях диэлектрика. При критических значениях напряженности электрического поля в газовых и паровых каналах начинает развиваться процесс ударной ионизации газа, завершающейся пробоем.

Пробой твердых диэлектриков представляет собой или чисто электрический процесс (электрическая форма пробоя), или тепловой процесс (тепловая форма пробоя). В основе электрического пробоя лежат явления, в результате которых в твердых диэлектри-

ках имеет место лавинное возрастание электронного тока, подобно тому как это наблюдается в процессе ударной ионизации в газобразных диэлектриках.

Характерными признаками электрического пробоя твердых диэлектриков являются:

1. Независимость или очень слабая зависимость электрической прочности диэлектрика от температуры и длительности приложенного напряжения (до 10^{-7} — 10^{-8} с).

2. Электрическая прочность твердого диэлектрика в однородном поле не зависит от толщины диэлектрика (до толщин 10^{-4} — 10^{-5} см).

3. Электрическая прочность твердых диэлектриков находится в сравнительно узких пределах: 10^8 — 10^9 В/м; причем она больше, чем при тепловой форме пробоя.

4. Перед пробоем ток в твердом диэлектрике увеличивается по экспоненциальному закону, а непосредственно перед наступлением пробоя наблюдается скачкообразное возрастание тока.

5. При наличии неоднородного поля электрический пробой происходит в месте наибольшей напряженности поля (краевой эффект).

Тепловой пробой имеет место при повышенной проводимости твердых диэлектриков и больших диэлектрических потерях, а также при подогреве диэлектрика посторонними источниками тепла или при плохом теплоотводе. Процесс теплового пробоя твердого диэлектрика состоит в следующем. Вследствии неоднородности состава отдельные части объема диэлектрика обладают повышенной проводимостью. Они представляют собой тонкие каналы, проходящие через всю толщину диэлектрика. Вследствие повышенной плотности тока в одном из таких каналов будет выделяться значительное количество теплоты. Это повлечет за собой еще большее нарастание тока вследствие резкого уменьшения сопротивления этого участка в диэлектрике. Процесс нарастания теплоты будет продолжаться до тех пор, пока не произойдет тепловое разрушение материала (расплавление, науглероживание) по всей его толщине — по ослабленному месту.

Характерными признаками теплового пробоя твердых диэлектриков являются:

1. Пробой наблюдается в месте наилучшего теплоотвода от диэлектрика в окружающую среду.

2. Пробивное напряжение диэлектрика снижается с повышением температуры окружающей среды.

3. Пробивное напряжение снижается с увеличением длительности приложенного напряжения.

4. Электрическая прочность уменьшается с увеличением толщины диэлектрика.

5. Электрическая прочность твердого диэлектрика уменьшается с ростом частоты приложенного переменного напряжения.

При пробое твердых диэлектриков часто наблюдаются случаи, когда до определенной температуры имеет место электриче-

ский пробой, а затем в связи с дополнительным нагревом диэлектрика наступает процесс теплового пробоя диэлектрика (рис. 3-22). Аналогичный переход электрической формы пробоя в тепловую происходит в зависимости от времени выдержки твердого диэлектрика под напряжением.

Согласно выводам теории теплового пробоя твердых диэлектриков (В. А. Фок, Н. Н. Семенов) можно подсчитать пробив-

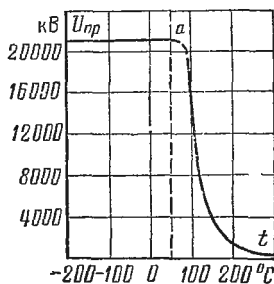


Рис. 3-22. Зависимость пробивного напряжения от температуры для электротехнического фарфора (а — точка перехода к тепловому пробую).

ное напряжение для простых электроизоляционных конструкций (пластины) по формулам

а) для постоянного напряжения

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{33,6k_d}{\alpha\gamma_0}} \varphi(c);$$

б) для переменного напряжения

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{60,5k_d}{\alpha\epsilon_r f \lg \delta}} 10^6 \varphi(c),$$

где $\varphi(c)$ — функция величины

$$c = \frac{k_0 h}{k_a + k_0 \Delta} \frac{k_a}{k_d}$$

k_0 — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; k_a — коэффициент теплопроводности электродов; k_d — коэффициент теплопроводности диэлектрика; h — половина толщины диэлектрика; Δ — толщина электрода; a — температурный коэффициент коэффициента диэлектрических потерь ТК ($\epsilon_r \lg \delta$); f — частота.

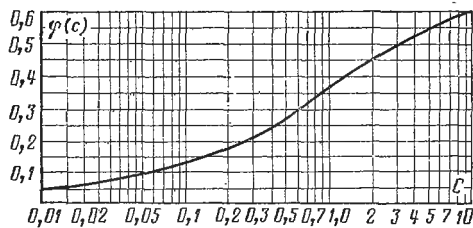


Рис. 3-23. Значения функции $\varphi(c)$. К расчету пробивного напряжения твердого диэлектрика при тепловом пробое (по В. А. Фоку).

По известным значениям k_0 , h , k_d , k_σ , Δ вычисляют c и, воспользовавшись графиком (рис. 3-23), находят $\varphi(c)$.

При возрастании c функция $\varphi(c)$ стремится к пределу, равному 0,66.

3.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Процессы намагничивания

Ферромагнетики обладают доменной структурой. Намагниченность домена равна намагниченности насыщения материала. Ее можно заметно изменить только путем из-

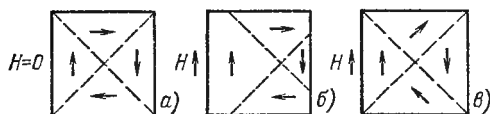


Рис. 3-24. Изменение доменной структуры при намагничивании.

менения температуры. При наложении внешнего поля изменяется свободная энергия домена за счет появления нового слагаемого — энергии магнитных моментов во внешнем поле. В результате домены приобретают равновесное состояние уже при ином расположении, нежели в отсутствие магнитного поля. Таким образом, возникает некоторая средняя намагниченность тела в направлении, близком к направлению внешнего поля.

Изменение намагниченности образца (рис. 3-24, а) при постоянной температуре и намагниченности домена происходит в результате:

перемещения границ и соответствующего изменения объема доменов с ростом тех из них, у которых намагниченность M_s составляет острый угол с внешним магнитным полем H (рис. 3-24, б);

процессов вращения, связанных с поворотом векторов M_s внутри домена (рис. 3-24, в).

Оба процесса могут быть разделены в свою очередь на обратимые и необратимые в зависимости от доли энергии, рассеиваемой в виде тепла. Необратимые процессы намагничивания определяют все явления магнитного гистерезиса.

Процессы смещения играют основную роль в области слабых полей на начальном участке кривой намагничивания. Процессы вращения играют основную роль в области полей, больших тех, при которых крутизна кривой намагничивания достигает максимума. Процессы смещения заканчиваются с исчезновением доменной структуры, а процессы вращения — при полном насыщении материала.

Расположение границ между областями самопроизвольной намагниченности определяется минимумом полной свободной энер-

гии тела, включающей поверхностную энергию границ, магнитоупругую энергию областей и энергию внутренних магнитных полей рассеяния. Это условие должно выполняться и при обратимом смещении границ.

Смещение границ между смежными доменами может произойти, если по разные стороны от стенки будет различна плотность свободной энергии внешних сил. Полная работа внешнего давления при смещении граничной поверхности идет на покрытие роста энергии, связанной с силами магнитоупругой анизотропии, и компенсации изменения поверхностной энергии. Последние изменения происходят в общем случае в силу локального изменения энергии стенки домена при перемещении слоя в новые места кристалла, а также в силу изменения кривизны поверхности и деформации ограничивающего его контура.

Обратимые процессы вращения вектора спонтанной намагниченности вызываются теми же причинами, что и смещение стенок. Однако здесь процесс определяется зависимостью энергии анизотропии, магнитоупругой энергии и энергии домена в магнитном поле от ориентации вектора намагниченности.

Необратимые процессы намагничивания ферромагнетиков определяются тремя явлениями: задержкой роста зародышей перемещения, задержкой смещения границ между доменами и необратимыми процессами вращения.

Зародышами намагничивания называют области с самопроизвольной намагниченностью обратного направления (по отношению к основной ориентации намагниченности насыщения образца). Их возникновение может быть связано с двумя основными источниками. Во-первых, они могут возникнуть в результате того, что даже при насыщении образца остаются небольшие участки первоначальных доменов с направлением намагниченности, противоположным направлению магнитного поля, доводящего предварительно образец до насыщения. Во-вторых, размагничивающее поле, созданное пустотами, пористостями включениями и внутренними неоднородностями образца, может сделать внутреннее поле в небольших объемах вблизи таких искажений обратным по отношению к внешнему полю.

В чистом виде задержку роста зародышей можно наблюдать в образцах с прямоугольной петлей гистерезиса, когда при плавном изменении внешнего поля изменение намагниченности происходит одним скачком. При некотором поле старта зародыш начинает расти с конечной скоростью и поглощает весь объем образца. Это поле нужно для создания таких размеров зародыша перемещения, которые делают его дальнейший рост энергетически более выгодным, чем его исчезновение. После достижения поля старта и начала роста зародыша с установившейся скоростью рост может продолжаться при более слабом по-

ле. Минимальное значение этого поля называется критическим. Оно определяется теми потенциальными барьерами, которые должна преодолеть граница переманичивающейся области при движении через неоднородности материала.

Задержка в смещении границ доменов связана также с некоторыми видами неоднородностей, поскольку при их прохождении происходит образование локальной доменной структуры. По мере удаления основной границы от неоднородности сначала увеличиваются границы маленьких доменов, а затем, после их внезапного отрыва от основной границы, вокруг полости устанавливается новая доменная структура и выпрямляется основная стенка. Задерживающее действие неоднородности приводит к увеличению поля, необходимого для осуществления движения основной границы в окрестности неоднородности. Другие неоднородности, большие и малые, сказываются подобным же образом на смещении других границ и определяют коэрцитивную силу.

Если в ферромагнитном материале исключена возможность возникновения зародышей переманичивания, то в нем вообще исключены процессы смещения и переманичивание может осуществляться лишь с помощью процесса вращения вектора намагниченности. Необратимый характер процессов переманичивания как при смещении доменных границ, так и при вращении находит свое выражение в неоднозначности кривой намагничивания между отрицательным и положительным значениями коэрцитивной силы. Два устойчивых значения намагниченности на этом участке соответствуют двум минимумам свободной энергии, разделенным потенциальным барьером. Коэрцитивная сила соответствует тем граничным точкам этого двузначного участка, где энергетический барьер исчезает.

Вихревые токи при переманичивании и магнитная вязкость

Процессы намагничивания и переманичивания зависят не только от внешнего магнитного поля, но и от скорости его изменения. Одной из причин этого является размагничивающее действие вихревых токов, возникающих при движении доменной стенки. Их создает электрическое поле, индуцируемое в тех областях, в которых произошло изменение направления намагниченности. Напряженность электрического поля и плотность вихревых токов зависят от скорости движения доменной стенки. Они определяются условием иметь в каждый момент времени в неперемагниченном объеме напряженность результирующего магнитного поля не больше коэрцитивной силы.

Задержку в изменении намагниченности ферромагнитного образца, которую нельзя отнести к действию вихревых токов,

объясняют явлением, которое называется «магнитной вязкостью».

Такого рода магнитное последствие бывает двух типов: зависящее и не зависящее от температуры.

Временные эффекты в ферромагнетике условно можно также разделить на электронные и ионные. Электронные эффекты связаны с перераспределением электронной плотности оболочек 3d и 4s. По-видимому, этими процессами можно объяснить очень большие времена релаксации в марганцово-цинковых ферритах при низких температурах, когда практически не происходит процесса диффузии ионов.

Ионные эффекты магнитного последствия связаны со структурными изменениями в кристаллической решетке. Именно такими изменениями может быть объяснено то, что в карбонильном железе присутствие следов углерода приводит к появлению температурно-зависимого последствия. В нормальном состоянии, т. е. до упругой деформации, атомы углерода в кристаллической решетке располагаются с одинаковой вероятностью в любом промежутке между атомами железа, например в центрах грайей или ребер элементарной кубической ячейки. Под действием напряжений расстояния между атомами железа в соответствующих направлениях увеличиваются, повышая вероятность расположения атомов углерода именно в этих направлениях. Длительность перераспределения атомов углерода после наложения напряжений и определяет длительность как упругого, так и магнитного последствия. Связь между ними обусловлена зависимостью магнитных свойств от механических напряжений и магнитострикцией.

Динамическую петлю переманичивания можно лишь условно назвать петлей гистерезиса, поскольку ее форму, кроме остаточного влияния предшествовавших состояний, определяют вихревые токи и магнитная вязкость. Именно под влиянием вихревых токов и вязкости динамическая петля при возрастании частоты приобретает эллиптический характер. В слабых полях динамическая петля имеет форму, также близкую к эллипсу.

Признаком такой формы петли является синусоидальный характер изменения одновременно напряженности магнитного поля $H(t) = H_m \sin \omega t$ и магнитной индукции $B(t) = B_m \sin(\omega t - \delta)$, т. е. отсутствие у них высших гармоник. В этом случае намагниченную среду характеризует комплексная магнитная проницаемость

$$\mu_r = \dot{B}/\mu_0 \dot{H} = \mu_r e^{-i\delta} = \mu_{r1} - i\mu_{r2},$$

где $\mu_r = B_m/\mu_0 H_m = B/\mu_0 H$ — амплитудная проницаемость. Вещественная часть $\mu_{r1} = \mu_r \cos \delta$ соответствует обратимым квазиупругим процессам, а мнимая часть $\mu_{r2} = \mu_r \sin \delta$ — процессам, связанным с рассеянием энергии. Потери энергии на переманичивание характеризуются мощностью

$$P_0 = \omega \mu_{r2} \mu_0 H^2 = \omega \mu_{r1} \mu_0 H^2 \operatorname{tg} \delta = \omega ab/2,$$

где a и b — полуоси эллипса в координатах H и B .

Фазовый сдвиг δ определяет потери на перемагничивание, т. е. энергию, рассеиваемую на необратимые процессы. Поэтому его называют «углом потерь», причем $\operatorname{tg} \delta = \mu_{r2}/\mu_{r1}$.

В ферромагнитном образце конечных размеров вследствие *поверхностного эффекта* возникает неравномерное распределение электромагнитного поля, являющегося функцией координат и времени. Это вносит дополнительные осложнения при исследовании и расчете и без того сложных динамических характеристик среды, обладающей магнитной вязкостью и нелинейными статическими характеристиками. В результате этого средняя комплексная магнитная проницаемость образца, в частности пластины или ленты, оказывается отличной от комплексной магнитной проницаемости материала, причем в разной степени для разных частот, крутизны и форм изменения внешнего магнитного поля при периодическом и импульсном воздействии.

3-4. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Основные сведения

Сверхпроводимость — состояние материала, для которого характерно полное отсутствие сопротивления постоянному току и магнитного поля в толще сверхпроводника. Возникновение сверхпроводимости происходит при уменьшении температуры ниже определенного для каждого материала значения T_K , называемого «температурой (точкой) сверхпроводящего перехода» или «критической температурой». Для некоторых элементов при нормальном давлении критические температуры приведены

Таблица 3-5

Температура сверхпроводящего перехода и критическая магнитная индукция для чистых элементов

Элемент	T_K , К	B_0 , Т
Алюминий	1,19	0,0099
Ванадий	5,3	0,1370
Вольфрам	0,012	0,1070
Галлий	1,09	0,0051
Индий	3,40	0,0293
Иридий	0,14	0,0020
Кадмий	0,55	0,0030
Нйобий	9,2	0,1944
Осмий	0,65	0,0065
Олово- α	3,72	0,0309
Рений	1,7	0,0193
Рутений	0,5	0,0066
Свинец	7,2	0,0803
Талтал	4,39	0,0880
Торий	1,37	0,0162
Титан	0,39	0,0100
Таллий	2,39	0,0171
Цинк	0,9	0,0053
Цирконий	0,55	0,0047

Таблица 3-6

Критическая температура сплавов и химических соединений

Соединение	T_K , К	Соединение	T_K , К
Nb _{0,75} Zr _{0,25}	11,0	Li _{0,1-0,3} Ti _{1,1} S ₂	10—13
Nb _{0,75} Ti _{0,25}	10,0	Pb _{0,92} Mo _{0,08} S ₇	15,2
Nb ₃ Sn	18,3	LiTi ₂ O ₄	13,7
Nb ₃ Ge	23,2	MoN	13—14,8
(Hf _{0,5} Zr _{0,5}) V ₂	10,1	B ₂ Mo _{1,69} Zr _{0,31}	11,2
Nb Tc ₃	10,5	SnTe	0,02—1,1
Mo _{0,33} Re _{0,62}	14,6	GeTe	0,06—0,41
Rh Zr ₂	11,1	CrTiO ₃	0,03—0,35
Nb Ru ₃	15—16	InTe	1,0—1,5
Rh Zr ₃	11,0	NbSe ₂	3,5
NbN	17,3	NbS ₂	7,0
(Y _{0,7} Th _{0,3}) ₂ C _{3,1}	17,0	(SN) _x	5,4
			0,26

в табл. 3-5 [3-15], а для некоторых сплавов и химических соединений — в табл. 3-6 [3-14].

Критическая температура зависит от давления, внешнего магнитного поля, технологии изготовления образцов (в пленках она иная), структура кристаллов и сплавов. Сверхпроводимость отсутствует в чистых металлах, имеющих атомный магнитный порядок, т. е. переходных металлах с незастроенными d - и f -оболочками (Co, Fe, Ni, Gd и др.) — атомный магнетизм и сверхпроводимость являются исключительными друг друга явлениями. Сравнительно мало пока обнаружено сверхпроводников в щелочных, щелочноземельных, благородных металлах, редких землях и актинидах. Высокие температуры сверхпроводящего перехода могут быть у таких химических соединений, компоненты которых имеют низкие T_K или вообще не являются сверхпроводниками. Например, у азота и углерода сверхпроводимость отсутствует, у чистых вольфрама, циркония и молибдена $T_K < 1$ К, а для WC $T_K = 10$ К, у ZrN $T_K = 10,7$ К, у MoC $T_K = 14,3$ К. Открытие сверхпроводимости в полимере (SN)_x без участия металлических атомов означает начало нового этапа — изучения сверхпроводимости в органических соединениях. Наиболее высокими сверхпроводящими параметрами обладают сплавы и соединения на основе переходных металлов.

В магнитном поле вещество становится сверхпроводящим при критической температуре T , более низкой, чем обычно (T_K):

$$B_K \approx B_0 (1 - T^2/T_K^2),$$

где B_0 — критическая магнитная индукция при нулевой температуре; B_K — магнитная индукция, при которой происходит переход из сверхпроводящего состояния в нормальное при температуре $T < T_K$. Значения B_0 приведены в табл. 3-5. Очень тонкая проволока чистого сверхпроводника обладает

более высокой критической магнитной индукцией, чем объемный образец. Некоторые сплавы, например ниобий—слово, имеют волокнистую структуру, вследствие чего и в больших образцах материала критическая напряженность магнитного поля высока.

Сверхпроводимость объясняется взаимодействием электрона с решеткой кристалла, при котором возникает межэлектронное притяжение. Оно связано с характером деформации (поляризации) кристаллической решетки электрическим полем движущегося электрона. Как известно из квантовой механики, кристаллическая решетка при температуре $T=0\text{K}$ совершает «нулевые» колебания, соответствующие основному состоянию ($n=0$) гармонического осциллятора. Электрон, движущийся в кристалле, нарушает режим этих колебаний и переводит решетку в возбужденное состояние. Обратный переход ее сопровождается излучением энергии, которая поглощается другим электроном. Этот процесс может быть рассмотрен как излучение фонона электроном, движущимся в решетке, и с последующим поглощением фонона другим электроном.

Обмен виртуальными фононами согласно квантовомеханической теории и создает дополнительное притяжение между электронами. Если это притяжение превысит при низких температурах кулоновское отталкивание электронов, возникает сверхпроводимость. При этом электронная система превращается в связанный коллектив, для возбуждения которого требуется затрата конечной энергии. Возбужденное состояние отделено от основного некоторым энергетическим интервалом, называемым «энергетической щелью» Δ .

Притяжение между электронами будет наиболее сильным, если они обладают противоположными импульсами и спинами. Поэтому электронную систему в сверхпроводнике можно представить состоящей из связанных пар таких электронов, а возбуждение электронной системы — как разрыв такой пары. Электронные пары называют часто куперовскими по имени Купера, показавшего, что основное состояние нормального металла является неустойчивым относительно сколь угодно слабого притяжения между электронами на поверхности Ферми, в результате чего в такой системе электронам энергетически выгодно разбиться на связанные пары с нулевым суммарным импульсом и спином. Энергетическая щель Δ является мерой связи между электронами пары. Ее размеры составляют около 10 мкм , т. е. примерно в 10^4 раз больше периода решетки (около 10^{-1} нм).

Сверхпроводимость обусловлена взаимодействием электронов с фононами (решеткой кристалла). Энергия фонона $\hbar\omega$ не может быть сколь угодно большой, так как длина соответствующей акустической волны ограничена в кристалле снизу размером, приблизительно равном периоду решетки. Макси-

мальная энергия фонона соответствует в температурной шкале дебаевской температуре T_D . Поэтому переходить в связанное состояние в сверхпроводнике могут лишь электроны, расположенные вблизи уровня Ферми ($W_F \sim 10^4\text{ K}$) в слое толщиной $\hbar\omega \approx 10^2\text{ K}$. Из этого следует, что температура сверхпроводящего перехода не может превосходить температуры Дебая, хотя благодаря межэлектронному притяжению T_K оказывается приблизительно на порядок меньше T_D . Для многих элементов хорошо подтверждается экспериментально соотношение для энергетической щели при нулевой температуре $\Delta(0) = 1,76\text{ kT}_K$.

При температуре, отличной от абсолютного нуля, хаотическое тепловое движение приводит к возбуждению электронной системы и ослабляет притяжение между электронами. Поэтому энергетическая щель при данной температуре $\Delta(T) \approx \Delta(0) \sqrt{1 - T/T_K}$.

Электрическое сопротивление обусловлено диссипативным взаимодействием движущейся электронной системы (тока) с кристаллической решеткой или примесями. При наличии щели в энергетическом спектре квантовые переходы электронной системы не всегда возможны. При малых скоростях своего движения электронная система не возбуждается, что и означает движение «без трения», т. е. отсутствие электрического сопротивления ($\rho=0$). Сверхпроводимость исчезает, если плотность тока превышает некоторое критическое значение.

Электромагнитные свойства сверхпроводников

Одно из наиболее фундаментальных свойств сверхпроводников заключается в том, что магнитное поле не проникает в его толщу (эффект Мейсснера). Это соответствует нулевой относительной магнитной проницаемости ($\mu_r=0$) и идеальному диамагнетизму ($\chi=-1$). Нулевое значение индукции в толще сверхпроводящего образца является результатом того, что во внешнем магнитном поле на его поверхности возникает стационарный электрический ток, собственное магнитное поле которого противоположно внешнему полю и полностью его компенсирует внутри образца. Поверхностный слой сверхпроводника (обычно несколько десятков нанометров) обладает особыми свойствами, связанными с отличной от нуля напряженностью магнитного поля и экранирующими незатухающими токами.

Существенная особенность электродинамики сверхпроводников заключена в нелокальном характере связи плотностей тока с внешним полем. Это обусловлено тем, что электроны в сверхпроводнике пространственно связаны, коррелированы друг с другом. Если поле изменяет состояние одного электрона, то это благодаря межэлектронному взаимодействию влияет на поведение другого электрона. Вследствие нелокального характера электродинамики сверхпроводящего состояния ток в какой-либо точке зависит не

от напряженности поля в этой точке, а определяется в общем случае состоянием поля в ее окрестности, т. е. связь между током и полем носит интегральный характер.

Связь между током и напряженностью поля становится локальной, если напряженность поля изменяется медленно, например, когда глубина проникновения поля δ в сверхпроводник (поверхностный слой) велика по сравнению с размером куперовской пары ξ_0 . В этом случае плотность тока $J = \lambda A$, где A — векторный потенциал, определяемый из соотношения $H = \text{rot } A$. Тогда из уравнения Максвелла $J = \text{rot } H$ зависимость магнитного поля от координат будет описываться дифференциальным уравнением $\Delta H - \lambda H = 0$, решение которого для плоской границы сверхпроводника и вакуума дает экспоненциальный закон изменения магнитного поля в поверхностном слое $H(x) = H(0) e^{-x/\delta}$, где $\delta = \lambda^{-1/2}$ — глубина проникновения. Она близка к $5 \cdot 10^{-6}$ см.

Возбужденный в сверхпроводящем кольце ток становится незатухающим. Это является следствием не только отсутствия сопротивления (и тепловых потерь), но и квантовой природы явления, когда при определенных значениях тока исчезает излучение и орбиты электронов становятся устойчивыми. Из правила квантования Бора для электронной пары, движущейся в сверхпроводнике, следует, что связанный с ней магнитный поток оказывается квантованным. Квант магнитного потока или «флюксонид» $\Phi_0 = h/2e = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб.

Сверхпроводники с одной определенной температурой перехода в сверхпроводящее состояние называют *сверхпроводниками первого рода*. У них глубина поверхностного слоя δ меньше размера куперовской пары ξ_0 ($\delta < \xi_0$). К этой группе относятся все чистые сверхпроводящие металлы, за исключением Nb. Они обладают низкими значениями критических магнитных индукций B_k , выше которых сверхпроводимость разрушается. Это препятствует их использованию в качестве соленоидов для создания сверхсильных магнитных полей.

Ко второй группе относятся *сверхпроводники второго рода*, которые находятся в сверхпроводящем состоянии второго рода в интервале температур между нижним и верхним критическими значениями. У них глубина проникновения больше корреляционной длины ($\delta > \xi$). Чистый металл можно превратить в вещество второй группы путем введения точечных примесей или использования в виде тонких пленок. Здесь соударения электронов с примесями или границами пленок нарушают связь, образующую куперовскую пару, и уменьшают корреляционную длину $\xi < \xi_0$, поскольку $\xi^{-1} = \xi_0^{-1} + l^{-1}$ (l — длина свободного пробега электрона). Своеобразие электромагнитных свойств сверхпроводников второго рода приводит к тому, что в них существуют два значения критического поля.

Если магнитная индукция во внешнем

поле начинает превосходить значение нижней критической магнитной индукции, происходит частичное проникновение магнитного поля во всю толщу сверхпроводящего образца. При этом под действием силы Лоренца электроны в сверхпроводнике двигаются по окружностям, образуя вихри («абрикосовские вихри»). Внутри вихря скорость возрастает по мере приближения к оси, пока не достигнет критического значения и произойдет «срыв» сверхпроводимости. После этого сверхпроводящий образец оказывается пронизанным нитями из обычных, несверхпроводящих областей, ориентированных в направлении силовых линий магнитного поля. Магнитный поток, пронизывающий сечение вихря, один и тот же для всех вихрей и равен кванту магнитного потока. В виде таких отдельных порций магнитное поле проникает внутрь сверхпроводника. Такое состояние называется «смешанным» или «шубниковской фазой», поскольку Л. В. Шубников еще в конце 30-х годов высказал предположение о существовании сверхпроводимости II рода (теоретический анализ на основе уравнений Гинзбурга—Ландау принадлежит А. А. Абрикосову). Сверхпроводник в шубниковской фазе способен выдержать сильные магнитные поля.

По мере увеличения магнитного поля происходит увеличение и сближение вихревых нитей, пока расстояние между ними становится равным примерно 10^{-4} см и сверхпроводимость полностью разрушается. Соответствующая магнитная индукция называется верхней критической магнитной индукцией.

Если сквозь образец в шубниковской фазой пропустить поперек магнитного поля ток (он называется «транспортным током»), этот ток будет взаимодействовать с магнитным полем, проникшим в область вихревых нитей. Под действием силы Лоренца вихри начнут двигаться, что вызывает потери или диссипацию энергии. При движении несверхпроводящей фазы (в области вихря) сквозь кристаллическую решетку будет происходить, в частности, рассеяние электронов тепловыми колебаниями решетки, т. е. обычный механизм электрического сопротивления. Таким образом, появление транспортного тока в сверхпроводнике, находящемся в смешанном состоянии, сопровождается выделением тепла, что означает нулевое значение критического тока, разрушающего сверхпроводимость.

К последней группе относятся *сверхпроводники третьего рода*, называемые также жесткими или неидеальными сверхпроводниками второго рода в отличие от рассмотренных выше идеальных сверхпроводников второго рода. Материалы этой группы содержат крупные неоднородности, возникающие при выделении другой фазы или пластическом деформировании.

Характерной особенностью таких сверхпроводников является явление «пиннинга» (от слова «pinning» — закрепление), т. е. притягивание вихревых нитей к неоднород-

ностям и закрепление на них. Благодаря этому слабый транспортный ток не в состоянии оторвать абрикосовский вихрь от неоднородностей и вызвать его движение, т. е. тепловые потери. Вихри приходят в движение только в том случае, если воздействие силы Лоренца оказывается достаточным для того, чтобы преодолеть пиннинг и оторвать вихрь от неоднородности. Следовательно, после превышения транспортным током соответствующего критического значения и срыва вихрей с неоднородностей выделяется энергия и сверхпроводимость исчезает. Критический ток зависит от масштаба неоднородности, температуры и уровня внешнего магнитного поля.

Сверхпроводники третьего рода, сохраняя преимущество сверхпроводников второго рода (способность выдерживать сильные магнитные поля), устраняют их основной недостаток (нулевой критический ток). Неоднородности их структуры позволяют пропускать большие токи. Проволока из соединения ниобия с оловом (Nb_3Sn) позволяет пропускать ток с плотностью выше 10^5 А/см^2 в полях с индукциями порядка 10 Тл. Верхнее значение критической индукции соединений PbMe_2C_8 достигает 50 Тл (в качестве Me используются атомы Sn, Cu, Ag и др., окруженные восьмью атомами кислорода).

При переменном токе или при пульсациях внешнего магнитного поля происходят циклические изменения магнитной индукции внутри сверхпроводника, приводящие к диссипации энергии. При частотах, не превышающих десятки кГц, потери носят гистерезисный характер, определяемый амплитудным значением, и не зависят от формы тока. Критическая плотность переменного тока на частотах 10–100 Гц мало зависит от частоты и ее порядок величин ее амплитудные значения соответствуют критическим значениям плотности постоянного тока. С дальнейшим повышением частоты критическая плотность переменного тока падает и может стать более чем на два порядка ниже критической плотности постоянного тока.

Области применения сверхпроводников

Одно из важнейших достижений сверхпроводниковой техники—это создание сверхсильных магнитных полей, причем в достаточно большой области пространства. Современные сверхпроводящие соленоиды позволяют получить поля с магнитной индукцией около 20 Тл. Затраты энергии на охлаждение (получение жидкого гелия) при этом могут быть в 1000 раз меньше энергии, требуемой для питания обычного электромагнита.

Применение сверхпроводящих обмоток в трансформаторах и электрических машинах открывает возможность почти полностью устранить в них тепловые потери, сделать их значительно более компактными и увеличить единичные мощности. Одной из причин этого является возможность отка-

заться от стали, поскольку создаваемые сверхпроводниками магнитные поля намного превосходят их уровень в стальных ферромагнитных материалах. Компактность и экономия массы особенно существенны при создании магнитных систем космических кораблей, в частности, для защиты их от радиации.

Ведется инженерная проработка сверхпроводящих кабелей для модных линий передачи энергии (см. разд. 33). Использование сверхпроводящего состояния объемного резонатора позволяет поднять его добротность более чем на четыре порядка. На частоте 10^{10} Гц достигнута добротность $4 \cdot 10^8$.

Эффект механического отталкивания сверхпроводника, окруженного магнитной «подушкой», используется для создания опор без трения и электрических вращающихся машин с КПД, равным почти 100%. Принцип «сверхпроводящего подвеса» может быть использован как в гироскопах, так и в поездах сверхскоростной железной дороги.

Квантование магнитного потока в сверхпроводниках в сочетании с туннельным обменом куперовскими парами (эффект Джозефсона) лежит в основе магнитометров уникальной чувствительности, которые позволяют измерять индукции до 10^{-15} Тл. Использование нескольких вложенных друг в друга сверхпроводящих цилиндров можно добиться того, что во внутреннем цилиндре не будет содержаться ни одного кванта магнитного потока, т. е. добиться идеального магнитного экранирования.

3-5. ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Термоэлектронная эмиссия

Электронной эмиссией называют процесс выхода электронов из материалов.

Термоэлектронная эмиссия — электронная эмиссия, обусловленная нагревом материала, испускающего электроны.

Плотность тока термоэлектронной эмиссии чистых металлов определяется формулой Ричардсона — Дешмана

$$J_s = AT^2 e^{-W_0/kT} = AT^2 e^{-11600\phi/T},$$

где J_s — плотность тока эмиссии, А/м^2 ; T — температура металла, К; A — постоянная для данного металла; k — постоянная Больцмана, Дж/К; W_0 — работа выхода электронов (расстояние от вершины потенциального барьера на границе металла до уровня Ферми), Дж; ϕ — работа выхода, выраженная в вольтах; V .

Значения работы выхода ϕ и константы A для некоторых материалов приведены в табл. 3-7.

Термоэлектронная эмиссия используется в электровакуумных приборах. Электрод, эмитирующий электроны, называется катодом. Для изготовления металлических катодов чаще всего используется вольфрам, как один из наиболее тугоплавких металлов.

Таблица 3-7

Значения работы выхода ϕ и константы A для некоторых материалов

Материал	ϕ , В	A , $A/(m^2 \cdot K^2)$	Материал	ϕ , В	A , $A/(m^2 \cdot K^2)$
Cs	1,89	$162 \cdot 10^4$	Mo	4,27	$55 \cdot 10^4$
Ba	2,29	$60 \cdot 10^4$	W	4,54	$75 \cdot 10^4$
Th	3,41	$70 \cdot 10^4$	Hg	4,52	—

Образование на поверхности металла мономолекулярных пленок некоторых веществ сопровождается поляризацией атомов пленки или их ионизацией и вследствие этого возникновением ускоряющего электрического поля, снижающего работу выхода ϕ электронов из катода.

Наиболее распространенными в технике пленочными катодами являются катоды из торированных вольфрама и молибдена. Их работа выхода $\phi = 1,5 \div 2,6$ В.

Наиболее распространенными в современных электровакуумных приборах являются оксидные катоды, обладающие большой удельной эмиссией, сравнительно низкой рабочей температурой и высокой экономичностью (экономичность катода представляет собой отношение тока эмиссии к мощности накала катода).

В качестве материала основания при изготовлении оксидного катода используется вольфрам или никель. Активный слой представляет собой примесный полупроводник, образованный твердым раствором оксидов щелочноземельных металлов (BaO и SrO — двухкомпонентный оксид или BaO, SrO и CaO — трехкомпонентный оксид) с вкраплениями атомов чистого металла (Ba, Sr), представляющих собой донорные примеси, и поверхностным одноатомным слоем Ba.

У хорошо активированных катодов ϕ составляет 0,95—1,2 В.

Автоэлектронная эмиссия

Автоэлектронной (электростатической) эмиссией называют электронную эмиссию, обусловленную наличием у поверхности катода сильного, ускоряющего электроны электрического поля.

При наличии внешнего ускоряющего электрического поля у поверхности катода потенциальный барьер снижается, сужается и электроны просачиваются сквозь потенциальный барьер (туннельный эффект).

Фотоэлектронная эмиссия

Фотоэлектронной эмиссией называют электронную эмиссию с поверхности тел под действием падающего на нее излучения.

Фотоэлектронная эмиссия характеризуется двумя законами:

1) законом Столетова

$$I_{\phi} = k\Phi,$$

где I_{ϕ} — ток фотоэлектронной эмиссии; Φ — световой (или лучистый) поток; k — коэффициент пропорциональности, называемый чувствительностью фотокатода — спектральной в случае монохроматического излучения или интегральной при неразложенном (белом) излучении;

2) законом Эйнштейна

$$\left(\frac{mv^2}{2} \right)_{\max} = h\nu - e\phi,$$

где $\left(\frac{mv^2}{2} \right)_{\max}$ — максимальная кинетическая энергия покидающих катодов электронов; ν — частота падающего на катод света;

ϕ — работа выхода материала катода, В; $h = 6,55 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Закон Эйнштейна может быть также записан в виде

$$\left(\frac{mv^2}{2} \right)_{\max} = h(\nu - \nu_0),$$

где ν_0 — порог фотоэлектронной эмиссии, т. е. минимальная частота света, при которой возможна эмиссия с данного катода.

Пороговая частота ν_0 или пороговая длина волны λ_0 связана с работой выхода катода соотношением

$$\nu_0 = e\phi/h, \text{ или } \lambda_0 = 1236/\phi,$$

где ϕ , В, и λ_0 , нм.

В табл. 3-8 приведены значения λ_0 и работы выхода ϕ для некоторых металлов.

Таблица 3-8

Значения λ_0 для некоторых металлов

Металл	λ_0 , нм	ϕ , В	Металл	λ_0 , нм	ϕ , В
Pt	232	5,32	Ba	490	2,52
Ag	278	4,55	Na	525	2,35
Ni	268	4,61	K	550	2,25
Mg	345	3,68	Cs	640	1,93

Зависимость спектральной чувствительности k фотокатода от частоты (или длины волны) падающего света называют спектральной характеристикой катода.

Интегральная чувствительность k фотокатода, измеряемая обычно в мкА/лм, характеризует ток фотоэлектронной эмиссии на единицу светового потока неразложенного (белого) света от стандартного источника света — лампы накаливания с вольфрамовой спиралью при $T = 2850$ К.

У большинства металлов порог фотоэффекта лежит в ультрафиолетовой или коротковолновой части видимого спектра, а интегральная чувствительность их ничтожно мала.

Наиболее распространены в фотоэлектронной технике полупроводниковые фотокатоды.

На рис. 3-25 даны спектральные характеристики обычного и очувствленного кислородом сурьмяно-цезиевого катода и многощелочного катода (Na_2K) $\text{Sb}-\text{Cs}$. На

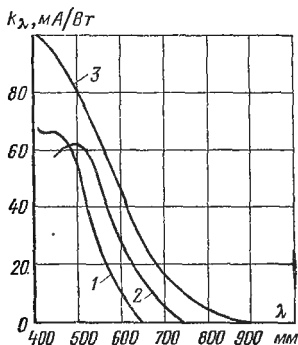


Рис. 3-25. Спектральные характеристики.

1 — сурьмяно-цезиевый катод обычный; 2 — катод, очувствленный кислородом; 3 — многощелочной катод.

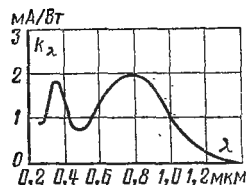


Рис. 3-26. Спектральная характеристика серебряно-кислородно-цезиевого катода.

рис. 3-26 приведена спектральная характеристика серебряно-кислородно-цезиевого катода.

Полупроводниковые катоды обнаруживают утомление (изменение чувствительности в рабочем режиме) и старение (медленное, необратимое уменьшение чувствительности со временем).

Наибольшее утомление характерно для серебряно-кислородно-цезиевого катода, меньшее — для сурьмяно-цезиевого катода.

Вторичная электронная эмиссия

Вторичной электронной эмиссией называют процесс выхода электронов из твердых или жидких тел под действием бомбардировки их поверхности первичными электронами. Вторичная эмиссия характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии σ :

$$\sigma = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_2}{I_1},$$

где n_2 — число эмиттированных вторичных электронов; n_1 — число пришедших на по-

верхность первичных электронов; I_2 и I_1 — вторичный и первичный токи.

Значение σ зависит от энергии первичных электронов. С ростом энергии первичных электронов eU_1 оно быстро увеличивается, достигает максимума ($\sigma_{\max}$) и далее медленно убывает.

У металлов $\sigma_{\max}$ не превышает 1,5, поэтому в приборах, где явление вторичной эмиссии используется для усиления тока (фотоэлектронные умножители и др.), применяются полупроводниковые вторично-электронные эмиттеры (диноды), у которых $\sigma_{\max}$ достигает 10—15.

Вторичная эмиссия под действием положительных ионов, метастабильных атомов и излучения разряда

Электронная эмиссия под действием положительных ионов характеризуется коэффициентом γ_i :

$$\gamma_i = \frac{n_e}{n_i} = \frac{I_e}{I_i},$$

где n_e — число эмиттированных электронов; n_i — число приходящих на катод ионов; I_e и I_i — электронный ток с катода и ионный ток на катод.

В условиях газового разряда на катод приходят и вызывают эмиссию электронов не только положительные ионы, но также метастабильные атомы, возбужденные атомы с относительно большими временами жизни, фотоны излучения разряда, быстрые нейтральные атомы.

В этом случае используется обобщенный коэффициент γ , учитывающий эмиссию электронов под действием этих трех видов частиц в расчете на один приходящий на катод ион.

В газовой среде не все выбиваемые из катода электроны уходят в разрядное пространство из-за частичного отражения от молекул газа и возвращения на катод. Этот эффект тем сильнее, чем больше давление газа и меньше напряженность электрического поля у поверхности катода (чем меньше отношение E/p). Вместе с тем при уменьшении E/p возрастает число метаста-

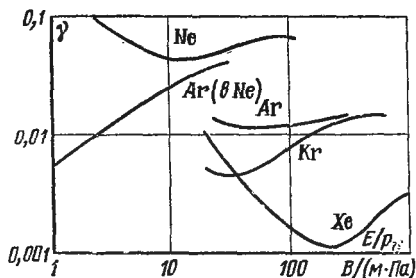


Рис. 3-27. Зависимость обобщенного коэффициента γ от E/p для различных газов.

бильных атомов и фотонов, генерируемых в разряде в расчете на один ион, что ведет к увеличению обобщенного коэффициента γ . Совместное действие этих двух эффектов дает сложную зависимость γ от E/p , показанную на рис. 3-27.

3-6. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ В ВАКУУМЕ И ГАЗАХ

Электрический ток в вакууме

К электронным (высоковакуумным) приборам относятся приборы, в которых степень разрежения газа столь велика, что средняя длина свободного пробега электронов $\bar{\lambda}_e$ много больше расстояния между электродами.

При плоском накаленном катоде, эмитирующем электроны, и плоском, параллельном катоду аноде связь между плотностью анодного тока I_a , анодным напряжением U_a и расстоянием между электродами d описывается законом «степени 3/2»

$$I_a = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{U_a^{3/2}}{d^2}.$$

Уравнение справедливо до тех пор, пока плотность анодного тока I_a остается меньше плотности тока термоэмиссии катода $I_{\text{т}}$. При дальнейшем увеличении U_a анодный ток, в первом приближении, остается неизменным (более строго, наблюдается слабый рост тока из-за образования у поверхности катода ускоряющего электрического поля).

При цилиндрическом катоде радиуса r_k , окруженного коаксиальным цилиндрическим анодом радиуса r_a , ток в амперах на метр длины анода

$$I_a = 14,65 \cdot 10^{-6} \frac{U_a^{3/2}}{\beta^2 r_a},$$

где β^2 — поправочный коэффициент, зависящий от отношения r_a/r_k и близкий к единице при $r_a/r_k \geq 10$.

Столкновения электронов и ионов с атомами и молекулами газа

Движение молекул, а также заряженных частиц (электронов и ионов) в газовой среде зависит от концентрации газа n (числа молекул в 1 м³ газа).

Она связана с давлением p , Па, и температурой газа T , К, соотношением

$$n = \frac{p}{kT} = 7,24 \cdot 10^{23} p/T.$$

При количественном учете актов столкновений атомов (молекул) газа обычно пользуются средней длиной свободного пробега молекул λ_m

$$\lambda_m = \frac{1}{\sqrt{2} q n} = \frac{k}{\sqrt{2} q} \frac{T}{p} = \lambda_{m0} \frac{T}{273 p} = \frac{\lambda_{m0}}{p_0},$$

где q — газокинетическое сечение молекулы (атома), м²; λ_{m0} — средняя длина свободного пробега молекул при $p=1$ Па и $T=273$ К (табл. 3-9); $p_0 = p \cdot 273/T$ — давление газа, приведенное к 273 К.

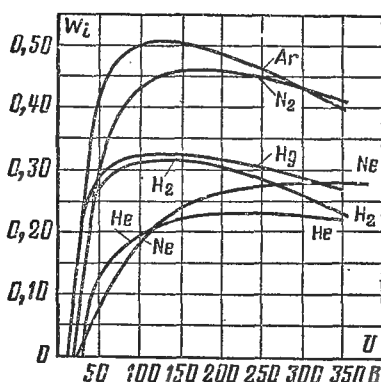


Рис. 3-28. Зависимость вероятности ионизации соответствующих атомов от энергии электронов.

При движении электронов в газе средняя длина их свободного пробега λ_e называется согласно кинетической теории газов равной:

$$\lambda_e = 4\sqrt{2} \lambda_m = 4\sqrt{2} \frac{\lambda_{m0}}{p_0} = \frac{\lambda_{e0}}{p_0}.$$

Однако действительное значение λ_e оказывается зависящим также от скорости движения (энергии) электронов. Скорость электрона v_e , м/с, связана с пройденной

Таблица 3-9

Значения λ_{m0} для некоторых газов при $p=1$ Па, $T=273$ К

Газ	He	Ne	Ar	H ₂	N ₂	O ₂	Пары Na	Пары Hg
λ_{m0} , м	$9,82 \cdot 10^{-8}$	$8,7 \cdot 10^{-8}$	$5,78 \cdot 10^{-8}$	$10,0 \cdot 10^{-8}$	$4,74 \cdot 10^{-8}$	$5,4 \cdot 10^{-8}$	$6,05 \cdot 10^{-8}$	$3,65 \cdot 10^{-8}$

разностью потенциалов U_e, B , соотношением

$$v_e = \sqrt{\frac{2eU_e}{m_e}}$$

Столкновения электронов с нейтральными невозбужденными атомами могут быть упругими или неупругими I рода (возбуждение и ионизация атома).

Кинетическая энергия, теряемая электроном и приобретаемая атомом при упругих столкновениях, невелика из-за большой разности масс электрона m_e и атома m_a (доля теряемой в среднем энергии порядка $2m_e/m_a$).

При неупругих столкновениях первого рода часть кинетической энергии электрона передается атому в виде энергии его возбуждения или ионизации.

На рис. 3-28 приведена зависимость вероятности ионизации w_i некоторых атомов от энергии электрона, выраженной в вольтах. Минимальная энергия, необходимая для ионизации или возбуждения данного атома, характеризуется соответственно потенциалами ионизации U_i или возбуждения U_b .

Вещество	H ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe
U_i, B	15,4	24,47	21,47	15,69	13,94	12,08

Процесс образования нейтрального атома (молекулы) при воссоединении электрона и положительного иона называется электронно-ионной рекомбинацией. Электронно-ионная рекомбинация может протекать двумя путем:

1. Рекомбинация в двойном ударе (радиационная)—непосредственное взаимодействие электрона и иона в газовой среде, при котором избыточная энергия выделяется в виде светового кванта. Рекомбинация в двойном ударе имеет место в разряде сравнительно высокого давления при достаточно большом разрядном токе.

В молекулярных газах возможна рекомбинация молекулярного иона с электроном, при которой выделяющаяся энергия идет на диссоциацию молекулы на атомы (диссоциативная рекомбинация). Интенсивность этого процесса велика даже при сравнительно низких давлениях.

2. Рекомбинация в тройном соударении. В этом случае ион сталкивается с электроном в присутствии третьей частицы, которой и передается избыточная энергия. Такой частицей обычно является атом газа, а поэтому интенсивность этого процесса пропорциональна не только концентрации электронов и ионов, но и концентрации нейтральных атомов газа. Вследствие этого рекомбинация в тройном соударении существенна при весьма высоких давлениях газа.

Частным случаем рекомбинации в тройном соударении является рекомбинация на стенках и электродах. Резко ограниченные возможности перемещения электронов и ионов на этих поверхностях делают вероятность рекомбинации близкой к единице и исчезновение электронов и ионов определяется исключительно условиями их

ухода из разряда на эти поверхности. При низких давлениях газа, когда эти условия облегчены, рекомбинация на стенках является основной.

Разновидностью неупругого удара II рода (наряду с процессами рекомбинации) является взаимодействие возбужденного атома с электроном или нейтральным атомом, которым передается энергия возбуждения. При этом происходит безызлучательный переход возбужденного атома в нормальное состояние. Вероятность такого процесса велика для метастабильных атомов, имеющих большое время жизни.

Другим результатом столкновения возбужденного (метастабильного) атома с быстрым электроном или световым квантом является переход электрона атома на более высокий уровень возбуждения (ступенчатое возбуждение) или полный отрыв электрона от атома (ступенчатая ионизация).

Эти процессы существенны при достаточных концентрациях возбужденных атомов и электронов, т. е. при достаточно больших (тысячи паскалей) давлениях и больших токах разряда.

Движение электронов и ионов в газе

В заполненном газом пространстве, в котором действует электрическое поле, движение заряженных частиц направленно-беспорядочное.

Во многих случаях электрического разряда в газе распределение электронов по энергиям (скоростям) подчиняется закону Максвелла

$$dn = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{n}{(kT_e)^{3/2}} e^{-W/kT_e} \sqrt{W} dW,$$

где dn — число электронов в данном объеме с энергиями от W до $W+dW$; n — полное число электронов в данном объеме; T_e — температура электронного газа; k — постоянная Больцмана.

В этих случаях беспорядочное движение электронов характеризуется температурой электронного газа T_e .

При этом среднеарифметическая скорость v_e , среднеквадратическая скорость v_e и наиболее вероятная скорость v_{e0} беспорядочного движения связаны с T_e соотношениями

$$\begin{aligned} \bar{v}_e &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_{e0} = \sqrt{\frac{8}{3\pi}} \bar{v}_e = \\ &= \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}. \end{aligned}$$

Средняя энергия электронов

$$\frac{m_e \bar{v}_e^2}{2} = eU_e = \frac{3}{2} kT_e.$$

где U_e соответствует средней энергии электронов, В.

В случае, если в газовом объеме движутся ионы и их распределение по энергиям соответствует закону Максвелла или не слишком от него отступает, для них могут быть записаны соотношения, аналогичные приведенным для электронного газа.

Направленное движение электронов и положительных ионов под действием силы электрического поля происходит (вследствие «трения» их о частицы газа) с некоторой постоянной средней скоростью $\bar{v}_x$.

Для положительных ионов

$$\bar{v}_{ix} = \mu_i E,$$

где E — напряженность электрического поля.

Коэффициент пропорциональности μ_i называется подвижностью ионов.

Рассмотрение взаимодействия иона и молекулы нейтрального газа как соударения упругих шаров приводит к выражению

$$\begin{aligned} \mu_i &= 0,815 \frac{e \lambda_{i0}}{m_i \bar{v}_i} = \\ &= 0,815 \frac{e \lambda_{i0}}{m_i \bar{v}_i} \frac{1}{\bar{p}_0}, \end{aligned}$$

где λ_{i0} — средняя длина свободного пробега иона при давлении 1 Па; $\bar{p}_0$ — давление газа, Па, приведенное к 273 К; m_i — масса иона; $\bar{v}_i$ — средняя скорость беспорядочного движения ионов, м/с.

Формула дает несколько завышенные значения μ_i , так как не учитывает электрического взаимодействия ионов с атомами (явлений поляризации атомов и перезарядки).

Для случаев, когда существенное влияние оказывает перезарядка,

$$\bar{v}_{ix} = 52 \frac{U_i}{\sqrt{\mu}} \left(\frac{E}{p_0} \right)^{1/2},$$

где U_i — потенциал ионизации газа, В; μ — атомная масса газа.

На рис. 3-29 приведены кривые зависимости $\bar{v}_{ix}$ от E/p_0 для криптона и ксенона. Пунктиром изображены расчетные зависимости.

Для электронов также используется понятие подвижности μ_e . Однако сложный характер взаимодействия электронов с атомами приводит к тому, что μ_e зависит не только от рода и давления газа, но и от напряженности электрического поля E . На рис. 3-30 приведены кривые зависимости $\bar{v}_{ex}$ от E/p_0 для ряда газов.

Направленное движение заряженных частиц в газе может возникать за счет перепада их концентраций (диффузионное движение). Скорости диффузионного движения при наличии зарядов одного знака

(электронов или ионов) выражаются диффузионными уравнениями

$$v_{ex} = - \frac{D_e}{n_e} \frac{dn_e}{dx}; \quad v_{ix} = - \frac{D_i}{n_i} \frac{dn_i}{dx},$$

где D_e и D_i — соответственно коэффициенты диффузии электронов и ионов; n_e , n_i — концентрации электронов или ионов в данной точке; dn/dx — градиент концентрации частиц в данной точке.

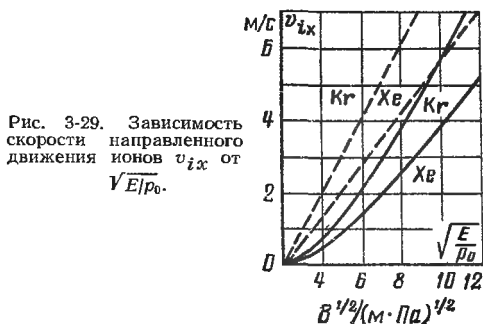


Рис. 3-29. Зависимость скорости направленного движения ионов v_{ix} от $\sqrt{E/p_0}$.

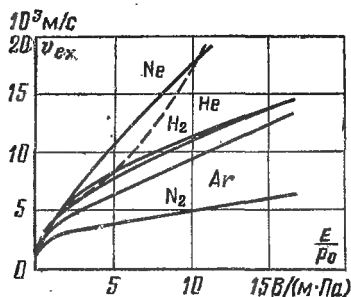


Рис. 3-30. Зависимость скорости направленного движения электронов v_{ex} от E/p_0 .

Коэффициенты диффузии могут быть вычислены по уравнениям

$$D_e = \mu_e \frac{kT_e}{e} = \mu_e \frac{T_e}{11600};$$

$$D_i = \mu_i \frac{kT_i}{e} = \mu_i \frac{T_i}{11600}.$$

В случае, когда в газовом объеме имеются заряды двух знаков (электроны и положительные ионы), причем концентрации их равны в каждой точке, имеет место дипольная диффузия. При этом вследствие электрического взаимодействия между электронами и ионами скорость их диффузионного движения определяется коэффициентом дипольной диффузии D_a :

$$D_a = \frac{D_e \mu_i + D_i \mu_e}{\mu_i + \mu_e},$$

или приближенно

$$D_a \approx \mu_i \frac{k}{e} (T_e + T_i) = \mu_i \frac{T_e + T_i}{11\,600}.$$

При сравнительно низких давлениях газа $T_i \ll T_e$, и тогда $D_a \approx \mu_i T_e / 11\,600$.

На рис. 3-31 приведены кривые зависимости D_a от давления газа p_0 для инертных газов и паров ртути.

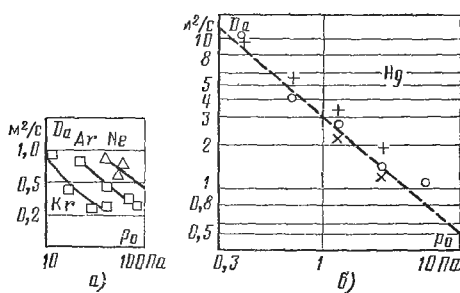


Рис. 3-31. Зависимость коэффициента диффузии D_a от давления p_0 .

а — для инертных газов; б — для паров ртути.

3-7. ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗАХ

Электрические разряды в газе делятся на две группы: несамостоятельные и самостоятельные разряды.

Несамостоятельным разрядом называют электрический разряд, требующий для своего поддержания образования в разрядном промежутке заряженных частиц под действием внешних факторов (внешнего воздействия на газ или электроды, увеличивающего концентрацию заряженных частиц в объеме).

Самостоятельным разрядом называют электрический разряд, существующий под действием приложенного к электродам напряжения и не требующий для своего поддержания образования заряженных частиц за счет действия других внешних факторов.

Если разрядную трубку с двумя плоскими холодными электродами наполнить газом и включить в электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 3-32, а, то можно снять вольт-амперную характеристику. Участки ее соответствуют следующим видам разряда: *I* — несамостоятельный темный разряд, *II* — самостоятельный темный разряд, *III* — переходная форма разряда от темного к тлеющему, *IV* — нормальный тлеющий разряд, *V* — аномальный тлеющий разряд, *VI* — переходная форма от тлеющего разряда к дуговому, *VII* — дуговой разряд*.

* Интервалы токов даны ориентировочно, так как они могут изменяться в зависимости от рода и давления газа, материала электродов и расстояния между ними.

Приведенная на рис. 3-32, б вольт-амперная характеристика не включает в себя видов разряда, возникающих при высоких давлениях, а именно искрового, коронного и безэлектродного высокочастотного.

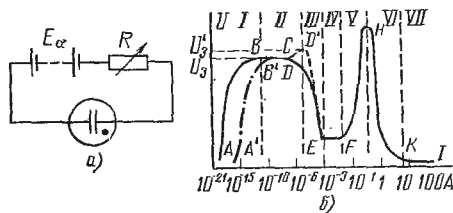


Рис. 3-32. Самостоятельный разряд.

а — схема включения разрядной трубки; б — вольт-амперная характеристика самостоятельного разряда.

Темный разряд и развитие самостоятельного разряда

При несамостоятельном темном разряде развитие электронных лавин описывается уравнением

$$I_a = I_0 e^{\alpha x_a},$$

где I_a — ток на анод с учетом газового усиления; I_0 — ток электронов с катода; x_a — расстояние между катодом и анодом; α — коэффициент объемной ионизации (число ионизаций, производимых электроном на 1 м пути).

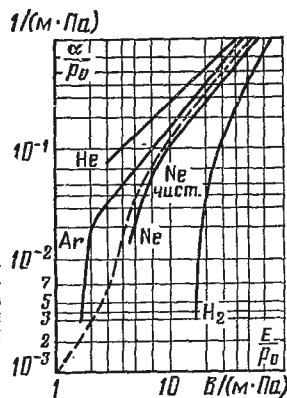


Рис. 3-33. Относительный коэффициент ионизации α/p_0 в функции отношения напряженности поля к давлению газа E/p_0 .

При учете процесса вторичной электронной эмиссии из катода под действием бомбардировки его ионами

$$I_a = I_0 \frac{e^{\alpha x_a}}{1 - \gamma(e^{\alpha x_a} - 1)},$$

где γ — коэффициент вторичной эмиссии катода под действием ионной бомбардировки.

Значения $\gamma = f\left(\frac{E}{p_0}\right)$ приведены в § 3-6

(рис. 3-27). Значения $\frac{\alpha}{p_0} = f\left(\frac{E}{p_0}\right)$ для инертных газов приведены на рис. 3-33. Условие самостоятельности разряда, полученное Таунсендом, имеет вид:

$$\gamma(e^{\alpha x_a} - 1) = 1.$$

Из этого выражения следует, что на протяжении возникновения самостоятельного разряда $U_{a,з}$ является функцией произведения давления газа p_0 и расстояния между электродами x_a .

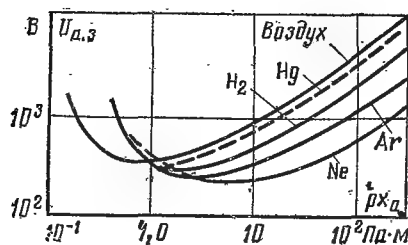


Рис. 3-34. Зависимость напряжения возникновения самостоятельного разряда $U_{a,з}$ от произведения давления газа на расстояние между электродами $p_0 x_a$.

ду электродами x_a . Такие зависимости («кривые Пашена») для разных газов и различных материалов электродов приведены на рис. 3-34.

Тлеющий разряд

На рис. 3-35 показан схематически вид тлеющего разряда, характеризующийся че-

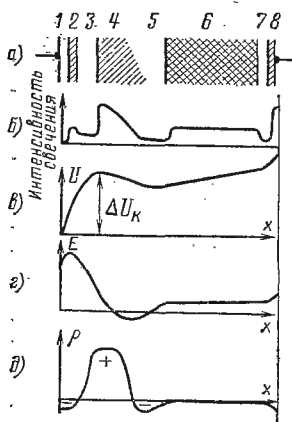


Рис. 3-35. Тлеющий разряд.

а — внешний вид; б — распределение интенсивности свечения; в — распределение потенциала; г — напряженность поля; д — распределение объемных зарядов.

редованием темных и светящихся слоев газа, носящих названия:

- 1 — первая катодная темная область;
- 2 — первое катодное свечение;
- 3 — вторая катодная темная область;
- 4 — второе катодное свечение (катодное тлеющее свечение);
- 5 — фарадеева темная область;

- 6 — столб разряда;
- 7 — анодная темная область;
- 8 — анодное свечение.

Катодное падение потенциала $\Delta U_{к,п}$ при нормальном тлеющем разряде (свечением покрыта только часть поверхности катода) зависит от материала катода и рода газа и не зависит от давления газа и тока.

Ширина $d_{к,н}$ области нормального катодного падения потенциала зависит от материала катода и рода газа. Зависимость от давления газа определяется соотношением $d_{к,н} p_0 = \text{const} = 0,15 \div 1,0$ м·Па.

Для нормального тлеющего разряда характерна постоянная (нормальная) плотность тока на катоде J_n .

При изменении давления газа p_0 нормальная плотность тока изменяется по закону

$$J_n = J_{n0} p_0^\alpha,$$

где J_{n0} — нормальная плотность тока на катоде при $p_0 = 1$ Па; α — постоянная, зависящая от геометрии электродов и рода газа.

При плоских электродах обычно $\alpha \approx 2$ (для Ne $\alpha \approx 1,5 \div 1,75$).

Когда при увеличении анодного тока вся поверхность катода покрывается свечением, катодное падение потенциала начинает возрастать с увеличением плотности тока. Такое катодное падение называется аномальным катодным падением потенциала, а сам разряд называется аномальным тлеющим разрядом.

Прикатодные области разряда 1—4 (рис. 3-35), в которых сосредоточено катодное падение потенциала, являются жизненно необходимыми для существования тлеющего разряда. Участки 5 (фарадеева темная область) и 6 (столб разряда) являются пассивными участками разряда с хорошей электропроводностью, связывающими анодные области разряда 7 и 8 с катодными областями разряда.

В столбе разряда газ находится в сильно ионизированном состоянии, причем концентрация электронов и ионов примерно равны, т. е. объемный заряд компенсирован. Газ, находящийся в таком состоянии, называется плазмой.

Особенности и характеристики плазмы рассмотрены ниже.

При сближении анода с катодом последовательно сокращаются, а затем исчезают столб разряда, анодная область, фарадеево темное пространство. При вторжении в область тлеющего свечения падение напряжения на приборе резко возрастает (затрудненный разряд).

Дуговой разряд

Понятие дугового разряда охватывает несколько видов разряда, внешним признаком которых является низкое (порядка

ионизационного потенциала) катодное падение потенциала.

В зависимости от давления газа в разрядном промежутке различают дугу при пониженном давлении и дугу при высоком и сверхвысоком давлении. Они различаются главным образом физическими процессами в столбе разряда (плазме).

По виду эмиссии электронов из катода различают:

- а) дугу с независимым накалом катода (несамостоятельный дуговой разряд);
- б) термоэлектронную дугу;
- в) дугу с холодным катодом (электростатическая эмиссия).

а) Дуга с независимым накалом катода характеризуется двумя режимами горения: когда анодный ток I_a меньше тока термоэлектронной эмиссии катода $I_{a,к}$ и когда $I_a > I_{a,к}$ (за счет дополнительного вырывания электронов из катода электрическим полем). При нормальном режиме горения ($I_a < I_{a,к}$) катодное падение потенциала имеет величину порядка ионизационного потенциала газа U_i и практически не зависит от тока I_a . При $I_a > I_{a,к}$ катодное падение потенциала растет с ростом тока.

б) Термоэлектронная дуга имеет место при катодах из тугоплавких материалов. В результате разогрева катода ионной бомбардировкой на нем появляется раскаленное катодное пятно, являющееся источником электронов.

Процессы в столбе термодуги аналогичны процессам в дугах другого вида и столбе тлеющего разряда. Они описаны ниже.

в) Дуга с холодным катодом возникает при использовании в качестве катода легкоплавких металлов. Наиболее распространенным случаем дуги этого вида является дуга с ртутным катодом, горящая в парах ртути. Эмиссия электронов из ртутного катода концентрируется в одном или нескольких (в зависимости от тока) катодных пятнах. Плотность тока в элементарном катодном пятне достигает 10^{10} — 10^{11} А/м². При токах более 2—3 А образуется групповое пятно с плотностью тока $2 \cdot 10^7$ — $4 \cdot 10^7$ А/м². При токах более 30—50 А появляется несколько самостоятельных групповых пятен.

Выделение в катодном пятне энергии, приносимой из разряда ионами, приводит к интенсивному испарению ртути. В результате резко уменьшается длина свободного пробега электронов и ионное облако образуется на очень малых расстояниях от поверхности катода. Это обеспечивает при $\Delta U_k = 10$ В напряженность поля у поверхности катода порядка 10^8 В/м, достаточную для электростатической эмиссии электронов.

Коронный и искровой разряды

Коронный разряд возникает при сравнительно больших давлениях и конфигурации электродов, при которой поле в разрядном промежутке очень неравномерно.

Ионизация происходит лишь в тонком слое (около электрода с малым радиусом кривизны), называемом коронирующим слоем. На практике чаще всего встречается случай коронирующих цилиндрических проводов. При постоянном напряжении в зависимости от полярности коронирующего электрода различают отрицательную и положительную корону.

При повышении напряжения на коронирующем электроде корона может перейти в дуговой или искровой разряд (при мощности источника, недостаточной для поддержания стационарного дугового разряда). В случае положительной короны переход в искровой разряд происходит при меньшем напряжении, чем в случае отрицательной.

Температура газа в канале искры достигает 10 000 К, что приводит к возможности термической ионизации. Явления искрового разряда не укладываются в теорию лавинных разрядов и находят объяснение в теории стримеров.

Первое условие образования стримеров

$$\frac{\alpha}{p} e^{\frac{\alpha}{p} pd} = 2,19 \cdot 10^8 \frac{E_3}{p} \left(\frac{d}{pd} \right)^{1/2} d,$$

где α — коэффициент объемной ионизации, м⁻¹; p — давление газа, Па; d — расстояние между электродами, м; E_3 — напряженность поля между электродами, В/м.

Пользуясь этим выражением, можно найти напряжение искрового пробоя U_3 :

$$U_3 = E_3 d.$$

Вычисленные таким образом значения U_3 хорошо совпадают с экспериментальными данными при $pd > 250$ м·Па.

Второе условие образования стримеров

$$n_i \geq 7 \cdot 10^{20} \text{ нон/м}^3,$$

где n_i — концентрация ионов в голове лавины.

Для сравнительно коротких искровых промежутков второе условие всегда соблюдается при наблюдении первого.

При искровом пробое разрядного промежутка острие — плоскость напряженности поля, необходимая для пробоя, значительно меньше в случае положительного острия.

В табл. 3-10 приведены значения пробивных напряжений между плоскими электродами в воздухе при атмосферном давлении ($p = 10^5$ Па) и температуре 293 К.

В высоковольтной технике находят применение газы, электрическая прочность которых в несколько раз превышает электрическую прочность воздуха (азота).

В табл. 3-11 приведены данные о двух таких газах.

Имеется ряд газов, электрическая прочность которых в 6—10 раз превышает прочность воздуха. К ним, в частности, относятся четыреххлористый углерод

Таблица 3-10

Пробивные напряжения между плоскими электродами в воздухе при $p=10^5$ Па (760 мм рт. ст.) и $T=293$ К

d , см	$U_{пр}$, кВ	d , см	$U_{пр}$, кВ	d , см	$U_{пр}$, кВ
1	31,35	5	138,5	12	315,5
2	58,1	6	163,8	14	363,2
3	85,8	8	215,0	16	412,6
4	112,0	10	265,0		

Таблица 3-11

Данные о плотности, температуре кипения и относительной электрической прочности высокопрочных газов.

Химическая формула	Название	Плотность, кг/м ³	Температура кипения, °С	Относительное пробивное напряжение
N ₂	Азот	1,25	-196	1
SF ₆	Элегаз	6,7	-64	2,3—2,5
CCl ₂ F ₂	Дихлордифторметан (фреон-12)	6,33	-30	2,4—2,6

($U_{пр.отн}=6,3$). Однако их практическому использованию препятствуют повышенная химическая активность, токсичность и высокие температуры кипения.

Газовая плазма

Газовой плазмой называется сильно ионизированная газовая среда, характеризующаяся почти полным равенством концентраций положительно и отрицательно заряженных частиц. Обычно в плазме беспорядочное движение частиц преобладает над их направленным движением под действием электрического поля или в результате диффузии.

В состоянии плазмы газ находится в столбе и фарадеевой темной области тлеющего и дугового разрядов, высокочастотном разряде, канале искрового разряда, в стволе молнии.

Плазма характеризуется следующими параметрами: n_e , n_i — концентрации электронов и ионов; T_e , T_i , T_n — температуры электронного, ионного и нейтрального газов (атомов или молекул); J_e , J_i — плотности беспорядочных электронного и ионного

Таблица 3-12

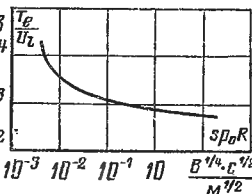
Значения коэффициентов α и s для некоторых газов

Коэффициенты	Ne	Ar	Hg
α , В ⁻¹	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-3}$
s , В ^{1/2} ·с ^{1/2} / (Па·м ^{3/2})	$4,42 \cdot 10^{-2}$	$3,97 \cdot 10^{-1}$	$8,25 \cdot 10^{-1}$

токов; J_{en} , J_{in} — плотности направленных электронного и ионного токов; E_l — продольная напряженность электрического поля.

Для средних давлений газа связь между этими параметрами устанавливается с помощью диффузионной теории.

Рис. 3-36. Универсальная зависимость температуры электронного газа T_e от произведения давления газа p_0 на радиуса разрядной трубки R (s — постоянная для данного газа).



Температура электронного газа T_e может быть найдена из выражения

$$\frac{1}{\sqrt{e U_i / k T_e}} e^{k T_e / e U_i} = 1,16 \cdot 10^5 (s p_0 R)^2,$$

где U_i — потенциал ионизации газа, В; p_0 — давление газа, Па, приведенное к 273 К; R — радиус разрядной трубки, м;

$$s = \sqrt{\frac{a \sqrt{U_i}}{\bar{\lambda}_{e0} \mu_i}} \text{ — константа для данно-}$$

го газа (табл. 3-12); $\bar{\lambda}_{e0}$ — средняя длина свободного пробега электронов при 1 Па, м; μ_i — подвижность ионов.

На рис. 3-36 приведен универсальный график зависимости температуры электронного газа от произведения $s p_0 R$.

Продольная напряженность электрического поля в плазме может быть вычислена по формуле

$$E_l = \frac{2,4}{R} \sqrt{\frac{D_a U_i}{\mu_e \eta_i}},$$

где R — радиус разрядной трубки; D_a — коэффициент двуполярной диффузии; U_i — потенциал ионизации; μ_e — подвижность электронов; η_i — доля мощности разряда, расходуемая на ионизацию.

На рис. 3-37, а приведены экспериментальные кривые зависимости продольной напряженности поля E_l от давления газа для инертных газов при диаметре разрядной трубки $D=2$ см, а на рис. 3-37, б — зависимости $E_l D$ от давления паров ртути.

Распределение концентрации зарядов по сечению разрядной трубки характеризуется формулой

$$n_{er} = n_{e0} J_0 \left(\frac{2,4r}{R} \right),$$

где n_{er} — концентрация зарядов на расстоянии r от оси трубки; $n_{e0} = 2,3 \frac{I_a}{e \pi R^2 \mu_e E_l}$ —

концентрация зарядов на оси; $J_0 \left(\frac{2,4r}{R} \right)$ — функция Бесселя нулевого порядка; R — радиус разрядной трубки. Средняя концентрация зарядов $n_e = n_{e0}/2,3$.

Плотности беспорядочного электронного J_e и ионного J_i токов определяются из соотношений

$$J_e = 2,48 \cdot 10^{-16} n_e \sqrt{T_e};$$

$$J_i = 4,96 \cdot 10^{-16} n_i \sqrt{\frac{m_e}{m_i} T_i},$$

где n_e и n_i — средние концентрации электронов и ионов; T_e , T_i — температуры электронного и ионного газов; m_e , m_i — массы электрона и иона.

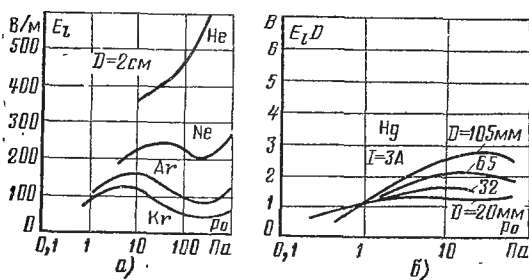


Рис. 3-37. Зависимость продольной напряженности поля E_L в плазме разряда от давления газа. а — в инертных газах при разрядном токе $I_a = 0,3$ А и диаметре трубки 2 см; б — в плазме ртутного разряда для различных диаметров разрядной трубки D при токе $I_a = 3$ А.

Соответственно

$$\frac{J_i}{J_e} = 2 \sqrt{\frac{T_i m_e}{T_e m_i}}.$$

Плотность направленного электронного тока J_{en} определяется как

$$J_{en} = en_e \mu_e E_L = 3,8 \cdot 10^{-12} n_e \frac{\lambda_{e0}}{\sqrt{T_e}} \frac{E_L}{p_0}.$$

Экспериментальное исследование параметров плазмы при средних давлениях, результаты которого были приведены выше, проводится по методу зондов Ленгмюра [3.3].

Для плазмы низкого давления диффузионная теория неприменима, и некоторые основные соотношения могут быть получены по теории Ленгмюра и Тонкса.

Теория плазмы высокого и сверхвысокого давления основана на том факте, что с ростом давления газа средняя кинетическая энергия заряженных частиц приближается к средней кинетической энергии частиц нейтрального газа, т. е. плазма ста-

новится по своим свойствам близкой к изотермической плазме ($T_e = T_i = T_n$).

Основными процессами в плазме высокого давления являются термическая ионизация и рекомбинация зарядов в объеме.

Степень ионизации газа характеризуется уравнением Саха

$$\alpha^2 p = A T^{5/2} e^{-\frac{eU_i}{kT}},$$

где α — степень ионизации ($n_e = n_i = \alpha n$); p — давление газа; $A = 6,55 \cdot 10^{-2}$; T — температура газа; U_i — потенциал ионизации газа.

На рис. 3-38 приведены графики зависимости $\alpha = f(T)$.

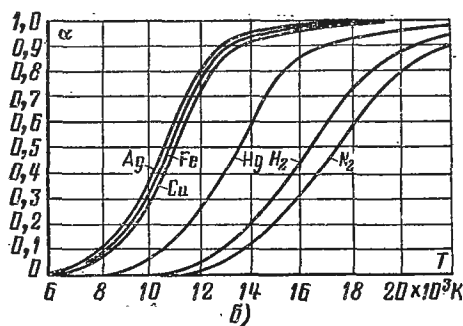
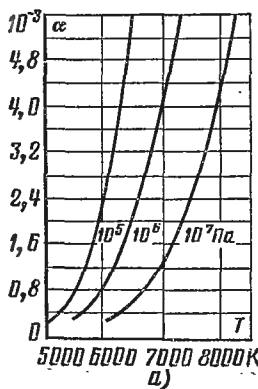


Рис. 3-38. Зависимость степени термической ионизации α от температуры T .

а — для ртути при разных давлениях; б — для паров Ag, Cu, Fe, Hg и газов H_2 и N_2 при $P = 10^{-6}$ Па.

Внешний вид плазмы высокого давления (например, столба тлеющего или дугового разряда) отличается тем, что она не заполняет всего сечения разрядной трубки, а представляет собой узкий ярко светящийся шнур по оси трубки. Процесс отщуривания тем сильнее, чем выше давление и больше плотность тока. Так как в отщурованном положительном столбе стенки разрядной трубки практически не играют роли, то дуга при атмосферном давлении может гореть на воздухе («дуга Петрова»). Температура шнура в парах ртути оказыва-

ется равной 5000—6000 К при давлении 10^5 Па и достигает 8000—10 000 К при давлении около $250 \cdot 10^5$ Па.

3-8. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Квантовая электроника основана на взаимодействии связанных электронов, атомов и молекул с электромагнитным полем, при котором происходит изменение внутренней энергии элементарных частиц. В основе работы квантовых усилителей и генераторов лежит эффект индуцированного (вынужденного) излучения. Он заключается в том, что под воздействием внешнего электромагнитного поля частица может излучать квант энергии и перейти в состояние с меньшей энергией.

Молекулы, атомы, ионы и электроны образуют микросистему, движение и ориентация микрочастиц которой определяют дискретный ряд энергий — энергетические состояния или энергетические уровни. Внутренняя энергия микрочастиц квантована. Они могут переходить только с одного энергетического уровня на другой. Если конечная внутренняя энергия при воздействии на нее электромагнитных колебаний больше начальной энергии, то разность между ними пополняется за счет поглощения энергии электромагнитного поля. И, наоборот, если энергия отдается электромагнитному полю, происходит излучение и конечное состояние системы соответствует меньшей энергии, чем начальное.

Энергия поля излучения (фотонов) также квантована, так что обмен энергией между полем и микросистемой может происходить только дискретно. Если энергия системы в верхнем энергетическом состоянии W_2 , а в нижнем W_1 , то частота ν_{21} электромагнитных колебаний, связанных с переходом системы между этими состояниями, определяется условием Бора $W_2 - W_1 = h\nu_{21}$. Излучение состоит, таким образом, из квантов с определенной частотой.

Если микросистема находится в верхнем энергетическом состоянии, то имеется определенная вероятность того, что через некоторый промежуток времени она перейдет в нижнее состояние и произойдет излучение энергии. Эта вероятность имеет две составляющие: постоянную и переменную. Постоянная составляющая аналогична вероятности распада радиоактивного вещества: она зависит от свойств системы и данного перехода и не зависит от внешних факторов. Переменная составляющая зависит от плотности энергии внешнего электромагнитного поля на частоте перехода. Поле на частоте перехода повышает вероятность излучения системой, находящейся в верхнем состоянии.

Если внешнее электромагнитное поле отсутствует, то процесс перехода системы в нижнее состояние, характеризуемый постоянной составляющей вероятности перехода

и сопровождаемый излучением, называется *спонтанным излучением*. Если на квантовую систему действует внешнее поле на частоте перехода, то спонтанные переходы происходят по-прежнему, причем фазы испускаемого излучения не зависят от внешнего электромагнитного поля. Однако переходы, вызванные внешним полем на частоте перехода, сопровождаются излучением, находящимся в определенном фазовом соотношении с внешним полем. Этот процесс называется вынужденным или *индуцированным излучением*.

Система, находящаяся в верхнем энергетическом состоянии, может, таким образом, стать источником излучения. Система, находящаяся в нижнем энергетическом состоянии, способна только поглощать излучение на частоте перехода. Микросистема может усиливать или генерировать излучение только в том случае, когда число частиц («населенность») на верхнем энергетическом уровне будет больше, чем на нижнем. Такое состояние системы называют *возбужденным* или инверсным, поскольку в условиях термодинамического равновесия населенность нижнего («основного») энергетического уровня всегда больше.

Для достижения возбужденного состояния система должна поглотить энергию и обязательно в виде излучения. Требуемая энергия может быть получена путем электронной или ионной бомбардировки, механическим воздействием, нагреванием и другими способами.

После прохождения в поглощающей среде пути l интенсивность (мощность) электромагнитного излучения $I \approx I_0 \exp(-kl)$, где коэффициент поглощения $k = \sigma(N_1 - N_2) + k_0$ увеличивается с ростом разности населенностей N_1 и N_2 нижнего и верхнего энергетических уровней и поперечного сечения поглощения σ (k_0 — коэффициент нерезонансных потерь). В условиях термодинамического равновесия или близких к ним $N_1 > N_2$, $k > 0$ и двухуровневая система всегда ведет себя как поглощающая. Для возбужденной системы характерны инверсия населенностей $N_2 > N_1$ и отрицательное значение коэффициента поглощения ($k = -\alpha < 0$). В этом случае плотность проходящего излучения будет по мере прохождения через среду непрерывно увеличиваться по экспоненциальному закону $I = I_0 \exp(\alpha l)$. В этом и заключается *эффект квантового усиления*.

Мощность излучения, выходящего из такого усилителя, тем больше, чем больше частиц участвует в переходах с верхнего уровня на нижний. При этом возрастает коэффициент усиления $\alpha = \sigma(N_2 - N_1) - k_0$. Усиление тем больше, чем больше путь l , пройденный лучом. Значительного увеличения этого пути можно добиться, помещая среду в резонатор, обеспечивающий многократное прохождение за счет многократных отражений. В диапазоне сверхвысоких частот для этой цели используются объемные полые металлические резонаторы. В опти-

ческом диапазоне резонатор образуют два параллельных зеркала.

Резонатор обеспечивает также обратную связь, которая позволяет превратить квантовый усилитель в *квантовый генератор*. Это происходит, когда уровень усиления превысит потери, а инверсная населенность превысит пороговое значение

$$N_2 - N_1 = \gamma / \sigma L,$$

где γ — коэффициент потерь; L — длина оптического резонатора.

Излучение квантового генератора обусловлено индуцированными переходами, которые происходят одновременно у большого числа возбужденных частиц, и поэтому имеет большую мощность. Вынужденное излучение происходит синфазно с индуцирующим излучением. Поэтому при индуцированном возбуждении обеспечивается фазовая когерентность и происходит сложение амплитуд элементарных излучателей. В результате амплитуда результирующей волны возрастает и может достигнуть уровня межмолекулярных полей. При спонтанном излучении, представляющем собой в основном неупорядоченный, статистический процесс, когерентность отсутствует и генерируются лишь шумы.

Характерными особенностями излучения лазеров (оптических квантовых генераторов) являются когерентность, монохроматичность и узконаправленность. Монохроматичность определяется квантованием энергии микрочастиц, стабильностью и дискретностью уровней, между которыми происходят энергетические переходы. Узконаправленность обеспечивается селективным характером усиления параксимальных лучей зеркалами оптического резонатора.

Источник питания предназначен для возбуждения лазерного активного элемента и обеспечивает такое распределение атомов по энергетическим уровням, при котором между двумя выбранными уровнями достигается инверсия. Двухуровневый метод использует для возбуждения те же два собственных состояния (уровня) системы, которые используются в процессе усиления. Поэтому инверсия и усиление должны быть разделены либо в пространстве, либо во времени.

Если инверсия и усиление разделены во времени, то для усиления и генерации используется та же среда, что и в процессе инверсии. Это означает, что система не может функционировать в качестве усилителя по крайней мере в течение времени, необходимого для осуществления инверсии. Такие системы могут быть использованы только в импульсном режиме и поэтому имеют ограниченную область применения.

В случае непрерывно действующего возбуждения ансамбль микросистем инвертируется вне области усиления. Затем возбужденная система вводится в область усиления, взаимодействует с полем сигнала и, наконец, выводится оттуда. Примером метода сортировки молекулярного пучка

является первый работавший квантовый усилитель на пучке молекул аммиака ($\lambda = 1,25$ см).

Трехуровневый метод использует эффект насыщения одного из переходов (между основным и верхним уровнем) под действием вспомогательного излучения в многоуровневой квантовой системе для получения инверсии населенностей между другой парой уровней этой системы (между основным и промежуточным метастабильным уровнем). Основным преимуществом этого метода является независимость систем возбуждения и усиления, поскольку для них резонансные частоты различны. Этот метод используется в рубиновых квантовых генераторах ($\lambda = 694,3$ нм). Большей эффективностью обладает четырехуровневый метод возбуждения за счет того, что усиление происходит при переходах с метастабильного уровня не на сильно заселенный основной, а на более высокий уровень (возбуждения) с меньшей населенностью. Поэтому инверсная населенность между этими уровнями может быть достигнута при относительно низких мощностях накачки (когда населенность самого верхнего уровня сравнительно мала). Четырехуровневый метод используется в неодимовых лазерах ($\lambda = 1,06$ мкм).

По типу фазового состояния активного вещества лазеры делятся на газовые, твердотельные и жидкостные.

Газовые лазеры для накачки используют разряды трех видов.

1) Слабоионизированный постоянный или высокочастотный разряд. Для непрерывно действующих лазеров на нейтральных атомах чаще всего используется столб тлеющего разряда при плотности тока $0,1—0,2$ А/см². Электронная концентрация прямо пропорциональна плотности тока, а средняя электронная температура определяется в большинстве случаев произведением давления газа в трубке и ее диаметра.

2) Импульсный разряд с послесвечением. Значительные плотности тока (до 300 А/см²) позволяют получить импульсную генерацию с большими усилением и выходной мощностью. В послесвечении разряда преобладают процессы с большими временами диссоциации и рекомбинации.

3) Импульсный разряд короткой длительности используется для накачки лазеров на самоограниченных переходах. Достижение инверсной населенности возможно только тогда, когда время нарастания импульса тока сравнимо с радиационным временем жизни верхнего энергетического уровня. При этом необходимые значения плотности тока достигают тысяч ампер на квадратный сантиметр.

В перечисленных условиях инверсная населенность достигается в результате действия одного или нескольких перечисленных ниже механизмов возбуждения: передача возбуждения (потенциальной энергии) от одного атома к другому в результате неупругого столкновения (II рода), передача

возбуждения при диссоциации (атом — молекула), оптическая накачка в результате селективного возбуждения (на резонансной частоте перехода), возбуждение атома неулучшим электронным ударом, накачка излучательными каскадными переходами, возбуждение при нейтрализации зарядов двух ионов, фотодиссоциации молекул (если энергия фотона достаточна для диссоциации молекулы, возбуждения атома и передачи кинетической энергии образовавшимся атомам).

Твердотельные лазеры используют в качестве активной среды примесные кристаллы, стекла и полупроводники. Генерация и усиление в примесных кристаллах осуществляются в результате переходов возбужденных ионов-активаторов, внедренных в решетку основного кристалла, в устойчивое состояние. Накачка производится оптически, чаще всего с помощью газоразрядных ламп. Кроме ионов-активаторов в кристаллы вводят иногда другие ионы, называемые сенсibilизирующими добавками. Они позволяют получить дополнительное поглощение энергии накачки и передать ее лазерному иону, повышая таким образом эффективность преобразования.

В лазерах на основе стекол, легированных ионами редкоземельных элементов, генерация и усиление излучения осуществляются при переходах этих ионов с возбужденных на устойчивые уровни. В качестве активаторов используются трехвалентные ионы Nd, Tb, Yb, Ho и Er. Лазеры на активированных стеклах работают в подавляющем большинстве в импульсном режиме, используя для оптической накачки ксеноновые газоразрядные лампы.

В полупроводниковых лазерах генерация и излучение происходят на переходах между зоной проводимости и валентной зоной или между зонами и уровнями, образуемыми примесями в запрещенной зоне самого полупроводника. Наибольшую эффективность и распространение имеет накачка путем инжекции носителей заряда и облучением пучком быстрых электронов. Используются иногда оптическая накачка и ударная ионизация при лавинном пробое. У большинства полупроводниковых лазеров условия генерации выполняются при температурах от 1,7 до 77 К. При комнатных температурах генерация получена в кристаллах ZnO, CdS, $Al_{1-x}Ga_xAs$, $GaAs_{1-x}P_x$ и GaAs. Наиболее широкое применение получили генераторы на арсениде галлия ($\lambda = 830 \div 910$ нм).

Жидкостные лазеры используют в качестве активных сред растворы, содержащие либо ионы редкоземельных элементов, либо органические красители. Эти лазеры используют оптическую накачку импульсных ксеноновых газоразрядных ламп или интенсивное излучение других лазеров. В лазерах на хелатах активными элементами являются трехвалентные ионы редких земель, связанные с органическими группами или лигандами. В качестве лиганд наиболее

часто употребляются бензолацетон, дибензоилметан, пентафторпропионат, тенонитрифторацетон и трифторацетилацетон, в качестве катионов — пиперидин, пиридин, натрий, аммиак и имидазол; в качестве растворителей — спирты (этанол, метанол), диметилформамид, ацетонитрил и диметилсульфоксид. Из апротонных жидких материалов лазерный эффект достигнут пока только в растворе соли редкоземельного элемента неодаима (Nd^{3+}) в неорганическом растворителе (селен- и фосфороксихлоридах). Лазерный эффект получен для шести классов органических красителей: оксазольных, антраценовых, кумариновых, акридиновых, ксантеновых и полиметиновых.

3-9. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДЯЩЕЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ СРЕДЕ

При движении проводящей среды в магнитном поле возникает сила Лоренца, обуславливающая соответствующие ЭДС и ток. Их возникновение и взаимодействие с электромагнитным полем относятся к той области явлений, которая получила название магнитогидродинамики. При этом предполагается, что число заряженных частиц в системе столь велико, что ее поведение допускает макроскопическое описание с помощью таких понятий, как плотность тока, проводимость, плотность массы и т. д. Движение системы носителей заряда при этом можно рассматривать как движение жидкости с определенными электрическими и магнитными свойствами.

Уравнения магнитогидродинамики

Сложная картина взаимодействия электромагнитных и гидродинамических явлений описывается на основе совместного решения уравнений электромагнитного поля и уравнений движения жидкости.

Гидродинамические уравнения включают уравнение непрерывности или сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0;$$

уравнение движения (Навье — Стокса)

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} \equiv \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} = -\operatorname{grad} p +$$

$$+ \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{v};$$

уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho w + \frac{E D}{2} + \frac{B H}{2} \right) + \frac{J^2}{\sigma} - J E_{\text{стоп}} = -\operatorname{div} \left(\mathbf{v} \frac{\rho v^2}{2} + \mathbf{v} \rho w + \right.$$

$$+ v\rho - v\sigma_{ik}^* - \kappa\nabla T + E \times H),$$

где v — скорость; ρ — плотность вещества; p — давление; η и ζ — первый и второй коэффициенты вязкости; κ — коэффициент теплопроводности; w — внутренняя энергия единицы массы и вязкий тензор напряжений;

$$\sigma_{ik}^* = \eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \zeta \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l}.$$

Электродинамические уравнения используют в виде

$$\operatorname{div} B = 0;$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \operatorname{rot}[v \times B] + \frac{1}{\sigma\mu_0} \nabla^2 B,$$

где σ — удельная проводимость.

Последнее уравнение есть результат включения из уравнений Максвелла напряженности электрического поля в движущейся среде, где плотность тока $J = \sigma E' = \sigma(E + v \times B)$. При этом предполагается, что магнитная проницаемость среды мало отличается от единицы, а электрическая проводимость постоянна, не зависит ни от времени, ни от координат, ни от магнитного поля (это не соблюдается в слишком разреженной среде и сильном магнитном поле).

«Вмороженность» и «диффузия» магнитного поля

Наглядное истолкование может быть дано последнему уравнению в предельном случае достаточно больших проводимостей, когда

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \operatorname{rot}[v \times B].$$

Это означает, что при перемещении какого-либо замкнутого «жидкого контура» в идеально проводящей среде он не будет пересекать силовых линий. Действительно, изменение во времени магнитного потока, который пронизывает контур, перемещающийся с окружающей средой, определяется изменением индукции во времени и пересечением этим контуром магнитных силовых линий:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt} &= \int \frac{\partial B}{\partial t} dS + \oint B \times v dt = \\ &= \int \left(\frac{\partial B}{\partial t} - \operatorname{rot}[v \times B] \right) dS = 0. \end{aligned}$$

То, что магнитный поток через всякую поверхность, опирающуюся на «жидкий контур», остается неизменным, означает, что магнитные линии как бы «приклеены»

или «вморожены» в вещество и перемещаются вместе с ним.

Условие «вмороженности» означает, что при движении среды поперек магнитного поля в ней индуцируются токи, поле которых, складываясь с первоначальным, так изменяет его, что магнитные линии смещаются вслед за средой. Поэтому движение среды вдоль линий не вызывает ЭДС.

Вмороженность приводит к тому, что поле усиливается при сжатии проводящей среды и ослабляется при ее расширении. Усиление и расширение поля не связаны с увеличением потока, поэтому они происходят почти безынерционно и не имеют ничего общего с изменениями поля под действием сторонних источников тока. Сохранение потока может объяснить происхождение магнитного поля звезд после сжатия газа со слабым полем. Подобное явление может быть использовано для образования больших, но кратковременных магнитных полей в земных условиях. В одном из экспериментов первоначальное магнитное поле 4—8 МА/м образовалось внутри медного цилиндра от разряда конденсаторной батареи на соленоид. Одновременно ударная волна от детонации окружающего взрывчатого вещества сминала цилиндр и вмороженное в него магнитное поле. В процессе сжатия в течение около 2 мкс удавалось получить поле 1,1 ГА/м. Принцип сжатия вмороженного в жидкий металл магнитного поля применяется и в гидромагнитах.

Аналогия между растространением магнитного поля в проводящей среде и явлением диффузии наиболее отчетливо можно проследить в другом частном случае, когда среда неподвижна и

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{1}{\sigma\mu_0} \nabla^2 B.$$

Сравнение этого уравнения с уравнением диффузии $\frac{\partial p}{\partial t} = D \nabla^2 p$ показывает, что проникновение электромагнитного поля в неподвижный проводник происходит по таким же законам, как изменение давления газа в процессе диффузии.

Своеобразным коэффициентом диффузии магнитного поля является величина $1/\sigma\mu_0$ — аналог коэффициента D . С ошибкой менее 5% можно считать, что расстояние половинного затухания поля, играющее роль глубины проникновения, $\delta \approx \sqrt{t/\sigma\mu_0}$, где t — время наблюдения (время диффузии). Явление вмороженности магнитных линий не является специфически магнитогидродинамическим явлением, поскольку оно может быть сведено к малой глубине диффузии магнитного поля на поверхности покоящегося тела.

Магнитное давление, электромагнитные насосы и ускорители

В гидродинамическом уравнении движения специфику магнитогидродинамики

выражает $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ в правой части. Именно оно выражает ту дополнительную силу, которая определяется магнитным полем. Пользуясь первым уравнением Максвелла и формулами векторного анализа, можно записать:

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = -\frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \times \text{rot } \mathbf{B} = -\text{grad } W_M + \\ + \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} \nabla) \mathbf{B},$$

где $W_M = B^2/2\mu_0 = \mathbf{H}B/2$.

Сравнивая последнюю формулу с уравнением сил, нетрудно видеть, что в нем объемная плотность магнитной энергии W_M может рассматриваться как магнитное давление $p_B = W_M$. Наиболее отчетливо это проявляется в тех простых геометрических конфигурациях, где поле имеет одно направление и второй член в последней формуле исчезает. Тогда (и только тогда) магнитная сила определяется выражением $\mathbf{J} \times \mathbf{B} = -\text{grad } p_B$.

Для статических условий из уравнения сил $p + p_B = \text{const}$, т. е. любое изменение механического давления жидкости или плазмы должно компенсироваться противоположным изменением магнитного давления p_B .

Существование магнитного давления делает возможной работу разнообразных магнитных насосов и ловушек. В исследовании управляемых термоядерных реакций магнитное поле используется для изоляции плазмы, нагретой до миллионов градусов, от стенок заключающего ее сосуда. Размеры плазменного канала с током определяются сжимающим действием магнитного давления (пинч-эффект), уравновешивающего давление раскаленной плазмы. Правда, в таких установках магнитное давление является источником и нестабильностей, вызванных локальными сжатиями и изгибами плазмы с током.

Магнитное давление может быть использовано помимо удержания плазмы также для разгона ее до больших скоростей. В обоих случаях магнитные поля могут создаваться токами либо во внешних проводниках, либо в самой плазме. Те же принципы применяются в электромагнитных насосах, служащих для перекачки расплавленных металлов. Простейшим устройством этого рода является *кондукционный электромагнитный насос*.

В насосе канал с проводящей жидкостью помещен между полюсами магнита. Электроды, расположенные в канале, позволяют пропускать ток через жидкость поперек канала и магнитного поля. Сила, возникающая при взаимодействии тока и поля, заставляет поток жидкости двигаться по каналу. Ток возбуждается внешним электрическим полем и является током проводимости или, как говорят иногда, током кондукции, почему насос и называют кондукционным.

Электромагнитные насосы, в которых ток не подводится через электроды, а возбуждается (индуцируется) переменными магнитными полями, называют *индукционными насосами*. Наибольшее распространение получили МГД-насосы с линейным плоским и цилиндрическими каналами и машины с винтовым каналом.

Жидкометаллические насосы начали находить применение вначале в связи с развитием реакторов на быстрых нейтронах. В таких реакторах МГД-машины используются в качестве насосов для перекачивания лития, калия и натрия при высоких температурах. По сравнению с механическими насосами их преимуществом является отсутствие движущихся механических частей, уплотнений, сложных подшипниковых узлов и т. п., что приводит к увеличению надежности и простоте обслуживания. Электромагнитные насосы с мощностью до нескольких сот киловатт полностью вытеснили механические насосы из вспомогательных систем ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Намечается широкое применение электромагнитных насосов в основных контурах станций с реакторами на быстрых нейтронах. Все шире такие насосы и другие типы МГД-устройств (перемешиватели, лотки, дроссели, дозаторы) используются в металлургии, литейном производстве, химической промышленности и т. п., позволяя механизировать и автоматизировать многие тяжелые производственные операции с жидким алюминием, цинком, свинцом, ртутью, чугуном и сталью.

Свободное парение проводящего тела в переменном магнитном поле можно также рассматривать как своеобразный критический режим электромагнитного насоса. Подвеска алюминиевого тела без подшипников при помощи переменного магнитного поля может найти применение в расходомере, подвешенном в потоке жидкости или газе. Но наиболее важное применение это явление нашло в «электромагнитном тигле», который позволяет плавить сверхчистые тугоплавкие металлы, весьма активные при высоких температурах, без соприкосновения с какими-либо огнеупорными материалами.

Ускорение плазмы по схеме кондукционного насоса называют ускорением в скрепленных полях. Ускорение по схеме индукционного насоса лежит в основе *асинхронного плазменного двигателя*. В обоих случаях магнитные поля создаются токами в специальных обмотках. Известны также «рельсовые схемы», в которых плазма ускоряется между двумя параллельными прямыми металлическими проводниками («рельсами») с токами, замыкающимися через плазму. Симметричное магнитное поле самой плазмы только сжимает токовый шнур. Виток, образованный рельсами и плазмой, приводит к концентрации магнитного поля с одной стороны проводящего газа. Возникающее избыточное магнитное давление толкает плазму вдоль проводов. Для впрыскивания плазмы в магнитные ловушки сконструиро-

ваны плазменные пушки, основанные на том же принципе и имеющие более удобную коаксиальную конструкцию, в котором каналом служит кольцевая щель между двумя параллельными цилиндрами. В этот промежуток и подается плазма быстродействующим клапаном. Радиальный ток в плазме, взаимодействуя с коаксиальным магнитным полем этого же тока, выталкивает плазму из пушки.

Приборы для ускорения плазмы аналогичны электродвигателю. По принципу действия двигателя постоянного тока происходит ускорение в скрещенных полях, по принципу действия асинхронного двигателя — бегущим полем. Электрический двигатель простым переключением можно превратить в генератор. С плазменным двигателем можно сделать то же самое, если его заставить не ускорить, а тормозить плазму. При этом кинетическая энергия плазменного потока будет преобразовываться в электрическую. Получается плазменный генератор или, как его называют, магнитогиродинамический генератор. Аналогичный принцип используют жидкометаллические МГД-генераторы.

Список литературы

- 3-1. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. — М.: Энергия, 1977. — 672 с.
- 3-2. ГОСТ 22622-77. Материалы полупроводниковые. Термины и определения.
- 3-3. Стафеев В. И., Каракушан Э. И. Магнитододы. — М.: Наука, 1975. 216 с.

3-4. Марченко А. М. Управляемые полупроводниковые резисторы. — М.: Энергия, 1978. — 215 с.

3-5. Хомерики О. К. Гальваномагнитные элементы и устройства автоматики и вычислительной техники. — М.: Энергия, 1975. — 176 с.

3-6. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1006 с.

3-7. Прикладная электролюминесценция. — М.: Советское радио, 1974. — 414 с.

3-8. Теория диэлектриков/Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Воробьев, Б. М. Тареев. — Л.: Энергия, 1965—344 с.

3-9. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. — М.: Энергия, 1979. — 328 с.

3-10. Корицкий Ю. В. Основы физики диэлектриков. М.: Энергия, 1979. — 248 с.

3-11. ГОСТ 21515-76. Материалы диэлектрические. Термины и определения.

3-12. Зенкевич В. Б., Сычев В. В. Магнитные системы на сверхпроводниках. — М.: Наука, 1972, 260 с.

3-13. Буккель В. Сверхпроводимость. — М.: Мир, 1975. — 366 с.

3-14. Воиновский С. В., Изюмов Ю. А., Курмаев Э. З. Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений. — М.: Наука, 1977. — 384 с.

3-15. Кресин В. З. Сверхпроводимость и сверхтекучесть. — М.: Наука, 1978. — 190 с.

3-16. ГОСТ 23869-79. Материалы сверхпроводниковые. Термины и определения.

3-17. Кухаркин Е. С. Основы инженерной электрофизики. Ч. 1, Основы технической электродинамики. — М.: Высшая школа, 1969. — 510 с.

3-18. Добрецов Л. Н. Эмиссионная электроника. — М.: Наука, 1966. — 564 с.

3-19. Ворончев Т. А., Соболев В. Д. Физические основы электровакуумной техники. — М.: Высшая школа, 1967. — 352 с.

3-20. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. — М.: Высшая школа. — 376 с.

3-21. ГОСТ 13820-77. Приборы электровакуумные. Термины и определения.

Раздел 4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

СОДЕРЖАНИЕ

- 4-1. Линейные цепи постоянного и синусоидального токов 107
 - Постоянный ток (107). Мгновенное, действующее и среднее значения синусоидальных величин (107). Представление синусоидальных величин комплексными числами (108). Параметры элементов цепи и схемы замещения (108). Пассивные двухполюсники (109). Сопротивления и проводимости двухполюсников (110). Активные двухполюсники (113). Взаимная индуктивность (114). Мощност (114). Схемы электрических цепей и их графы (115). Законы Кирхгофа (116). Топографические векторные диаграммы (117). Резонанс напряжений и резонанс токов (118). Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей (119). Метод контурных токов (120). Метод узловых потенциалов (121). Применение топологических методов расчета (123). Взаимная эквивалентная

замена источников тока и ЭДС (124). Метод активного двухполюсника (124). Метод наложения (124). Преобразование схем соединения элементов треугольником и звездой (125). Метод подобия (125). Принцип компенсации (126). Теорема вариаций (126). Теорема взаимности (126). Линейные соотношения (126). Передаточная функция (126). Об обозначении напряжений на схемах (126). Сигнальные графы (127).

- 4-2. Трехфазные цепи 129
 - Трехфазная система с нейтральным проводом (129). Трехфазная система без нейтрального провода (130). Симметричная трехфазная система (130). Метод симметричных составляющих (131).
- 4-3. Несинусоидальные токи 131
 - Разложение периодических функций в тригонометрический ряд (131). Действующие и средние значения несинусо-

идальных периодических величин (133). Коэффициенты несинусоидальности (134). Мощность (134). Эквивалентные синусоиды (134). Вышние гармоники в трехфазных цепях (134). Взаимная связь магнитного потока, ЭДС индукции, напряжения и тока в катушке со стальным магнитопроводом (135). Схема замещения катушки со стальным магнитопроводом "при учете потерь (135)	
4-4. Переходные процессы	136
Переходные процессы в линейных цепях с сосредоточенными параметрами (136). Классический метод (136). Переходные процессы в простейших цепях (137). Метод переменных состояния (143). Операторный метод (145). Формулы Хевисайда (147). Интеграл Дюамеля (147). Интеграл Фурье (148). Включение ветвей (149). Отключение ветвей (149)	
4-5. Пассивные четырехполюсники, фильтры и линии	149
Несимметричные четырехполюсники (149). Симметричные четырехполюсники (152). Фильтры (155). Цепные схемы и другие соединения четырехполюсников (155). Линия с потерями (157). Определение постоянных линии по опытам холостого хода и короткого замыкания (157). Упрощенные формулы (158). Линия с малыми потерями (158). Линия без потерь (158). Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами (159). Отражение волны прямоугольной формы от конца линии (160). Падение волны прямоугольной формы на узел соединения двух линий (161)	
4-6. Электрическое поле	163
Закон Кулона (163). Напряженность поля. Потенциал (163). Поляризованность, смещение (165). Ток, плотность тока (166). Уравнения Лапласа и Пуассона. Граничные условия (166). Распределение потенциала в системе проводящих заряженных тел (166). Емкость (167). Частичные емкости (167). Моделирование (167). Энергия электростатического поля. Силы (167)	
4-7. Магнитное поле	167
Магнитная индукция и магнитный поток (167). Намагниченность. Напряженность магнитного поля (168). Закон полного тока (168). Потенциалы магнитного поля. Граничные условия (168). Энергия. Электродинамические силы (169). Электромагнитная индукция (наведение ЭДС) (169). Самоиндукция и взаимная индукция (169)	
4-8. Электромагнитное поле	169
Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в неподвижной среде (169). Граничные условия (170). Потенциалы (170). Уравнения Максвелла в комплексной форме (170). Определение потерь. Теорема Умова—Пойнтинга (170)	
4-9. Сопротивление, емкость, индуктивность	170
Сопротивление проводника (170). Емкость конденсаторов и проводов (170). Метод электростатической аналогии (171). Индуктивность и взаимная индуктивность проводов (171). Индуктивность катушек (172). Емкость, индуктивность и взаимная индуктивность воздушных линий (173). Индуктивность коаксиального кабеля (174)	
Список литературы	174

4-1. ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО И СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКОВ

Постоянный ток

При анализе и расчете цепей постоянного тока остаются справедливыми все законы и расчетные методы, записанные ниже для цепей переменного тока, если положить $\omega=0$ и вместо комплексных значений токов, напряжений и ЭДС в формулах брать действительные значения величин.

Мгновенное, действующее и среднее значения синусоидальных величин

Мгновенное значение синусоидальной (косинусоидальной) величины (рис. 4-1)

$$a = A_m \sin (\omega t + \alpha) = A_m \cos (\omega t + \beta);$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi / T,$$

где A_m — амплитуда (максимальное значение); ω — угловая (круговая) частота; f — частота (число циклов изменения в единицу времени); T — период; $\alpha = \beta + \pi/2$ — начальная фаза; $\omega t + \alpha$, $\omega t + \beta$ — фаза (в радианах или градусах).

Действующее значение

$$A = A_m / \sqrt{2}$$

равно среднеквадратическому за период

$$A^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a^2 d\omega t = \frac{1}{T} \int_0^T a^2 dt.$$

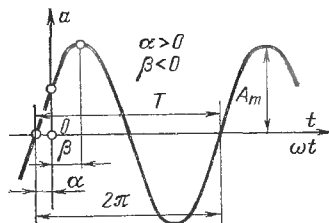


Рис. 4-1.

Среднее значение за период равно нулю. Среднее за половину периода

$$A_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_{-\alpha}^{\pi-\alpha} a d\omega t = \frac{2}{\pi} A_m.$$

Под синусоидальной величиной a можно понимать ток $i=i(t)$, напряжение $u=u(t)$, ЭДС $e=e(t)$, магнитный поток $\Phi(t)$ и т. д.

Представление синусоидальных величин комплексными числами

Всякую синусоидально изменяющуюся величину $a = A_m \sin(\omega t + \alpha)$ можно представить вектором на комплексной плоскости (рис. 4-2, а). Длина вектора равна амплитуде A_m , угол между вектором и осью действительных значений равен начальной фазе α .

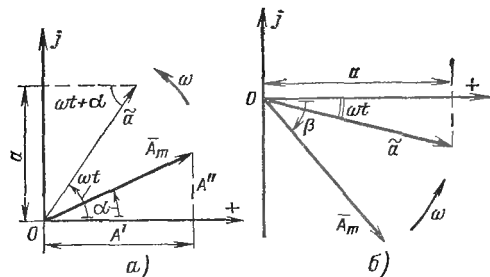


Рис. 4-2.

Вектор $\bar{A}_m$, изображающий синусоидальную величину a , обозначают $\bar{A}_m = A_m e^{j\alpha} = A_m \angle \alpha = A_m \cos \alpha + j A_m \sin \alpha = A' + j A''$ и рассматривают как комплексное число (комплексную амплитуду).

Если вращать вектор $\bar{A}_m = A_m$ с угловой скоростью ω (равной угловой частоте синусоидальной величины) против направления движения часовой стрелки, то в момент времени t вектор будет расположен под углом $\omega t + \alpha$ к оси действительных значений (рис. 4-2, а). Такой вращающийся вектор записывается в виде комплексной гармонической функции

$$\tilde{a} = A_m e^{j(\omega t + \alpha)} = \bar{A}_m e^{j\omega t}.$$

Мгновенное значение синусоидальной величины a есть проекция вращающегося вектора на ось мнимых значений или мнимая часть $\dot{A}_m e^{j\omega t}$.

$$\begin{aligned} a &= \text{мнимая часть } \tilde{a} = \text{Im} [A_m e^{j(\omega t + \alpha)}] = \\ &= \text{Im} [A_m \cos(\omega t + \alpha) + j A_m \sin(\omega t + \alpha)] = \\ &= A_m \sin(\omega t + \alpha). \end{aligned}$$

Если задана косинусоидально изменяющаяся величина $a = A_m \cos(\omega t + \beta)$, то она изображается вектором $\bar{A}_m = A_m e^{j\beta}$ (рис. 4-2, б) и мгновенное значение есть проекция вращающегося вектора $\tilde{a} = A_m e^{j(\omega t + \beta)}$ на ось действительных значений:

$$\begin{aligned} a &= \text{действительная часть } \tilde{a} = \\ &= \text{Re} [A_m e^{j(\omega t + \beta)}]. \end{aligned}$$

На комплексной плоскости обычно изображают не векторы $\dot{A}_m$, а векторы $\bar{A} =$

$= \dot{A}_m / \sqrt{2}$ — комплексные действующие значения синусоидальных величин.

Совокупность векторов $\bar{A}$, изображающих несколько синусоидальных величин, образует векторную диаграмму (см. рис. 4-3, 4-4 и др.).

При расчете электрических цепей начальная фаза α (или β) одной из синусоидальных величин может быть взята произвольной и, в частности, равной нулю. Все другие синусоидальные величины будут иметь тогда вполне определенные начальные фазы.

Параметры элементов цепи и схемы замещения

При анализе электрических цепей их заменяют схемами замещения, содержащими пассивные элементы: резистивный с активным сопротивлением r , индуктивный с индуктивностью L , емкостный с емкостью C и активные элементы: источники ЭДС (напряжения) и источники тока.

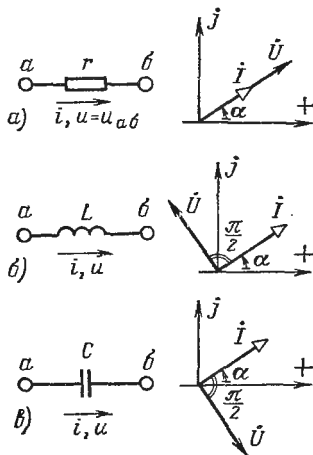


Рис. 4-3.

Резистивный элемент с активным сопротивлением r (рис. 4-3, а). Если $i = I_m \sin(\omega t + \alpha)$, то $u = u_{a\phi} = \varphi_a - \varphi_b = r i = r I_m \sin(\omega t + \alpha) = U_m \sin(\omega t + \alpha)$, где $U_m = r I_m$.

В комплексной форме $\dot{U}_m = r \dot{I}_m$ или $\dot{U} = r \dot{I}$, где

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m \angle \alpha}{\sqrt{2}}; \quad \dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m \angle \alpha}{\sqrt{2}}.$$

Индуктивный элемент с индуктивностью L (рис. 4-3, б). Если $i = I_m \sin(\omega t + \alpha)$, то $u = u_{a\phi} = L di/dt = U_m \sin(\omega t + \alpha + 90^\circ)$, где $U_m = \omega L I_m$; $\omega L = x_L$ — индуктивное сопротивление; $1/\omega L = b_L$ — индуктивная проводимость.

В комплексной форме

$$\dot{U} = \omega L \dot{I} e^{i90^\circ} = j\omega L \dot{I} = jx_L \dot{I}.$$

Емкостный элемент с емкостью C (рис. 4-3, в). Если $i = I_m \sin(\omega t + \alpha)$, то

$$u = \frac{1}{C} \int i dt = U_m \sin(\omega t + \alpha - 90^\circ),$$

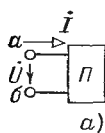
где $U_m = (1/\omega C) I_m$; $1/\omega C = x_C$ — емкостное сопротивление; $\omega C = b_C$ — емкостная проводимость.

В комплексной форме

$$\dot{U} = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = \frac{1}{j\omega C} \dot{I} = -jx_C \dot{I}.$$

Пассивные двухполюсники

Пассивные элементы могут соединяться последовательно, параллельно, смешанно (последовательно-параллельное соединение)



а)

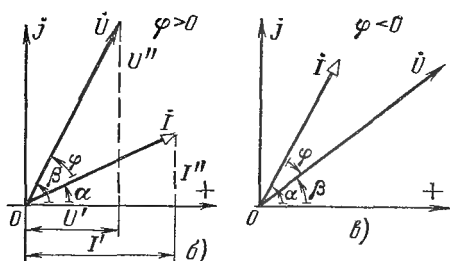


Рис. 4-4.

и составлять мостовые схемы, образуя пассивные двухполюсники (рис. 4-4, а). Если

$$u = u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = U_m \sin(\omega t + \beta),$$

то

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha); \quad U_m = z I_m; \quad I_m = y U_m,$$

где z — полное сопротивление двухполюсника; y — полная проводимость двухполюсника.

В комплексной форме

$$\dot{U} = \dot{U}_m / \sqrt{2} = U_m e^{j\beta} / \sqrt{2} = U \angle \beta;$$

$$\dot{I} = \dot{I}_m / \sqrt{2} = I_m e^{j\alpha} / \sqrt{2} = I \angle \alpha.$$

По закону Ома

$$\dot{U} = \underline{Z} \dot{I},$$

где $\underline{Z} = 1/\underline{Y} = z e^{j\varphi} = z \angle \varphi = r + jx$ — комплексное сопротивление двухполюсника; r — активное сопротивление; x — реактивное сопротивление;

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = x/r; \quad \cos \varphi = r/z.$$

Иначе

$$U e^{j\beta} = z e^{j\varphi} \cdot I e^{j\alpha},$$

откуда $U = z I$; $\beta = \varphi + \alpha$, где $\varphi = \beta - \alpha$ — угол сдвига фаз между напряжением и током.

По закону Ома

$$\dot{I} = \underline{Y} \dot{U},$$

где $\underline{Y} = 1/\underline{Z} = y e^{-j\varphi} = y \angle -\varphi = g - jb$ — комплексная проводимость двухполюсника; g — активная проводимость; b — реактивная проводимость;

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = b/g; \quad \cos \varphi = g/y.$$

Иначе

$$I e^{j\alpha} = y e^{-j\varphi} U e^{j\beta},$$

откуда $I = y U$; $\alpha = \beta - \varphi$.

Если $\varphi > 0$, то вектор напряжения на векторной диаграмме опережает вектор тока — индуктивный режим (рис. 4-4, б). Если $\varphi < 0$, то вектор тока опережает вектор напряжения — емкостный режим (рис. 4-4, а).

Угол сдвига фаз φ может быть определен из векторной диаграммы по проекциям векторов на две взаимно перпендикулярные оси (рис. 4-4, б):

$$\varphi = \beta - \alpha; \quad \operatorname{tg} \beta = U''/U'; \quad \operatorname{tg} \alpha = I''/I'.$$

В табл. 4-1 приведены схемы и даны параметры простых пассивных двухполюсников.

Примечания: 1. Если любая из ветвей двухполюсника содержит n последовательно соединенных резистивных, m индуктивных и p емкостных элементов, то

$$r = \sum_{k=1}^n r_k; \quad L = \sum_{k=1}^m L_k; \quad \frac{1}{C} = \sum_{k=1}^p \frac{1}{C_k}.$$

2. Если участок двухполюсника содержит n параллельно соединенных резистивных, m индуктивных и p емкостных элементов, то

$$\frac{1}{r} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_k}; \quad \frac{1}{L} = \sum_{k=1}^m \frac{1}{L_k}; \quad C = \sum_{k=1}^p C_k.$$

Как для схем, приведенных в табл. 4-1, так и в общем случае пассивный двухполюсник может быть представлен двумя схемами замещения (рис. 4-5, а и б).

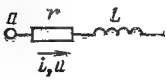
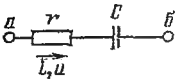
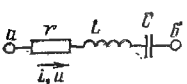
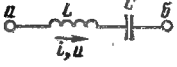
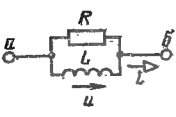
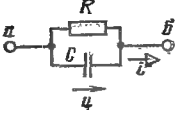
Для схемы замещения по рис. 4-5, а

$$\dot{U} = \underline{Z} \dot{I} = \dot{U}_a + \dot{U}_p,$$

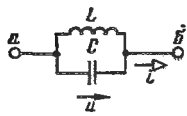
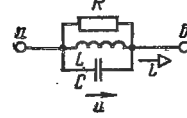
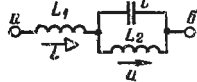
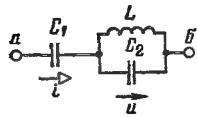
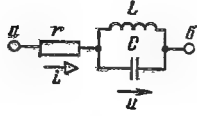
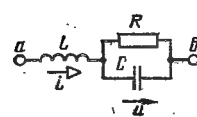
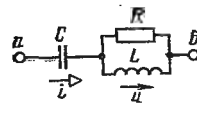
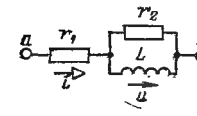
где $\dot{U}_a = \dot{I}$ — активная составляющая напряжения; $\dot{U}_p = jx \dot{I}$ — реактивная составляющая напряжения.

Таблица 4-1

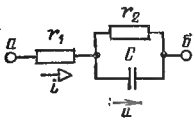
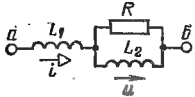
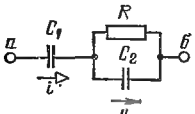
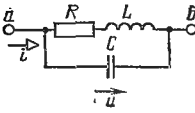
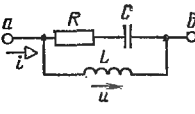
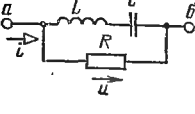
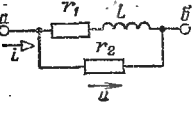
Сопротивления и проводимости двухполюсников

Схема	Сопротивление	Проводимость	Векторная диаграмма
	$\underline{Z} = r + ix_L;$ $x_L = x = \omega L;$ $\operatorname{tg} \varphi = x_L / r$	$g = \frac{r}{r^2 + x_L^2};$ $b = \frac{x_L}{r^2 + x_L^2} = b_L;$ $\underline{Y} = g - jb_L;$ $\operatorname{tg} \varphi = b_L / g$	По рис. 4-4, б
	$x = -x_C = -1/\omega C;$ $\underline{Z} = r - ix_C;$ $\operatorname{tg} \varphi = -x_C / r$	$g = \frac{r}{r^2 + x_C^2};$ $b = \frac{-x_C}{r^2 + x_C^2} = -b_C;$ $\underline{Y} = g + jb_C;$ $\operatorname{tg} \varphi = -b_C / g$	По рис. 4-4, в
	$x = x_L - x_C = \omega L - 1/\omega C;$ $\underline{Z} = r + i(x_L - x_C);$ $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L - x_C}{r}$	$g = \frac{r}{r^2 + (x_L - x_C)^2};$ $b = \frac{x_L - x_C}{r^2 + (x_L - x_C)^2};$ $\underline{Y} = g - jb;$ $\operatorname{tg} \varphi = b / g$	При $x_L > x_C$ ($b > 0$) — по рис. 4-4, б; при $x_L < x_C$ ($b < 0$) — по рис. 4-4, в
	$x = x_L - x_C = \omega L - 1/\omega C;$ $z = x_L - x_C ;$ $\underline{Z} = i(x_L - x_C)$ при $x_L > x_C$ угол $\varphi = 90^\circ$, при $x_L < x_C$ угол $\varphi = -90^\circ$	$g = 0; b = \frac{1}{x_L - x_C};$ $\underline{Y} = -jb$	При $x_L > x_C$ по рис. 4-3, б; при $x_L < x_C$ по рис. 4-3, в
	$r = \frac{g}{g^2 + b_L^2};$ $x = \frac{b_L}{g^2 + b_L^2} = x_L;$ $\underline{Z} = r + ix_L;$ $\operatorname{tg} \varphi = x_L / r$	$g = \frac{1}{R};$ $b = b_L = 1/\omega L;$ $\underline{Y} = g - jb_L;$ $\operatorname{tg} \varphi = b_L / g$	По рис. 4-4, б
	$r = \frac{g}{g^2 + b_C^2};$ $x = \frac{-b_C}{g^2 + b_C^2} = -x_C;$ $\underline{Z} = r - ix_C;$ $\operatorname{tg} \varphi = -x_C / r$	$g = \frac{1}{R};$ $b = -b_C = -\omega C;$ $\underline{Y} = g + jb_C;$ $\operatorname{tg} \varphi = -b_C / g$	По рис. 4-4, в

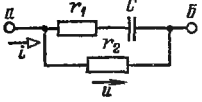
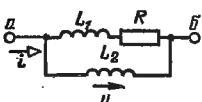
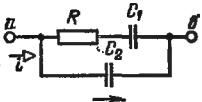
Продолжение табл. 4-1

Схема	Сопротивление	Проводимость	Векторная диаграмма
	$r = 0;$ $x = \frac{1}{b_L - b_C};$ $\underline{Z} = jx$ при $b_L > b_C$ угол $\varphi = 90^\circ$, при $b_L < b_C$ угол $\varphi = -90^\circ$.	$g = 0;$ $b = b_L - b_C = 1/\omega L - \omega C;$ $y = b_L - b_C ,$ $\underline{Y} = -j(b_L - b_C)$	При $b_L > b_C$ по рис. 4-3, б; при $b_L < b_C$ по рис. 4-3, в
	$r = \frac{g}{g^2 + (b_L - b_C)^2};$ $x = \frac{b_L - b_C}{g^2 + (b_L - b_C)^2};$ $\underline{Z} = r + jx;$ $\operatorname{tg} \varphi = x/r$	$g = 1/R;$ $b = b_L - b_C = 1/\omega L - \omega C;$ $\underline{Y} = g - j(b_L - b_C);$ $\operatorname{tg} \varphi = (b_L - b_C)/g$	При $b_L > b_C$ ($x > 0$) — по рис. 4-4, б; при $b_L < b_C$ ($x < 0$) — по рис. 4-4, в
	$r = 0; x = x_{L1} - \frac{x_{L2} x_C}{x_{L2} - x_C}$	$g = 0$	При $x > 0$ ($b > 0$) — по рис. 4-3, б; при $x < 0$ ($b < 0$) — по рис. 4-3, в
	$r = 0; x = -x_{C1} - \frac{x_L x_{C2}}{x_L - x_{C2}}$	$b = 1/x$	
	$x_L = \omega L; x_C = 1/\omega C;$ $x = -\frac{x_L x_C}{x_L - x_C};$ $\underline{Z} = r + jx$	Переход от активного r и реактивного x сопротивлений к активной g и реактивной b проводимостям по общим формулам перехода от схемы замещения по рис. 4-5, а к схеме замещения по рис. 4-5, б (с. 113)	
	$r = \frac{R}{1 + (R/x_C)^2};$ $x = x_L - \frac{x_C}{1 + (x_C/R)^2} = X_L - X_C$		
	$r = \frac{R}{1 + (R/x_L)^2};$ $x = \frac{x_L}{1 + (x_L/R)^2} - x_C = X_L - X_C$		
	$r = r_1 + \frac{r_2}{1 + (r_2/x_L)^2};$ $x = \frac{x_L}{1 + (x_L/r_2)^2}$	По рис. 4-4, б	

Продолжение табл. 4-1

Схема	Сопротивление	Проводимость	Векторная диаграмма
	$r = r_1 + \frac{r_2}{1 + (r_2/x_C)^2};$ $x = \frac{-x_C}{1 + (x_C/r_2)^2}$	Переход от активного r и реактивного x сопротивлений к активной g и реактивной b проводимостям по общим формулам перехода от схемы замещения по рис. 4-5, а к схеме замещения по рис. 4-5, б (с. 113)	По рис. 4-4, а
	$r = \frac{R}{1 + (R/x_{L2})^2};$ $x = \frac{x_{L2}}{1 + (x_{L2}/R)^2} + x_{L1}$		По рис. 4-4, б
	$r = \frac{R}{1 + (R/x_{C2})^2};$ $x = \frac{-x_{C2}}{1 + (x_{C2}/R)^2} - x_{C1}$		По рис. 4-4, в
	Переход от активной g и реактивной b проводимостей к активному r и реактивному x сопротивлениям по общим формулам перехода от схемы замещения по рис. 4-5, б к схеме замещения по рис. 4-5, а (с. 113)	$g = \frac{R}{R^2 + x_L^2};$ $b = \frac{x_L}{R^2 + x_L^2} - \frac{1}{x_C} = b_L - b_C$	При $b_L > b_C$ по рис. 4-4, б; при $b_L < b_C$ по рис. 4-4, в
		$g = \frac{R}{R^2 + x_C^2};$ $b = \frac{1}{x_L} - \frac{x_C}{R^2 + x_C^2} = b_L - b_C$	При $b_L > b_C$ по рис. 4-4, б; при $b_L < b_C$ по рис. 4-4, в
		$g = 1/R;$ $b = \frac{1}{x_L - x_C}$	При $x_L > x_C$ по рис. 4-4, б; при $x_L < x_C$ по рис. 4-4, в
		$g = \frac{1}{r_2} + \frac{r_1}{r_1^2 + x_L^2};$ $b = \frac{x_L}{r_1^2 + x_L^2}$	По рис. 4-4, б

Продолжение табл. 4-1

Схема	Сопротивление	Проводимость	Векторная диаграмма
	Переход от активной g и реактивной b проводимостей к активному r и реактивному x сопротивлениям по общим формулам перехода от схемы замещения по рис. 4-5, б к схеме замещения по рис. 4-5, а (с. 113)	$g = \frac{1}{r_2} + \frac{r_1}{r_1^2 + x_C^2};$ $b = \frac{-x_C}{r_1^2 + x_C^2}$	По рис. 4-4, в
		$g = \frac{R}{R^2 + x_{L1}^2};$ $b = \frac{1}{x_{L2}} + \frac{x_{L1}}{R^2 + x_{L1}^2}$	По рис. 4-4, б
		$g = \frac{R}{R^2 + x_{C1}^2};$ $b = -\frac{1}{x_{C2}} - \frac{x_{C1}}{R^2 + x_{C1}^2}$	По рис. 4-4, в

Значения U_a и U_p можно найти из векторной диаграммы путем построения треугольника напряжений (рис. 4-5, в; выполнен для случая $\varphi > 0$). Подобный ему треугольник, стороны которого в выбранном

треугольник, стороны которого в выбранном масштабе равны проводимостям g , b и $|b|$, есть треугольник проводимостей (рис. 4-5, д).

Вычисление g и b по известным r и x или наоборот, т. е. переход от схемы замещения по рис. 4-5, а к схеме замещения по рис. 4-5, б и наоборот, выполняется по формулам

$$g = \frac{r}{r^2 + x^2} = \frac{r}{z^2}; \quad b = \frac{x}{r^2 + x^2} = \frac{x}{z^2};$$

$$r = \frac{g}{g^2 + b^2} = \frac{g}{y^2}; \quad x = \frac{b}{g^2 + b^2} = \frac{b}{y^2}.$$

При $x > 0$ ($b > 0$) элемент, обозначенный на рис. 4-5, а (рис. 4-5, б) прямоугольником и буквой x (б) — индуктивный (для этого случая дана диаграмма на рис. 4-5, в), при $x < 0$ ($b < 0$) — емкостный.

Иногда принимают $Y = g + jb$, что противоречит ГОСТ 19880-74. Тогда

$$b = \frac{-x}{r^2 + x^2}; \quad x = \frac{-b}{g^2 + b^2}.$$

Рис. 4-5.

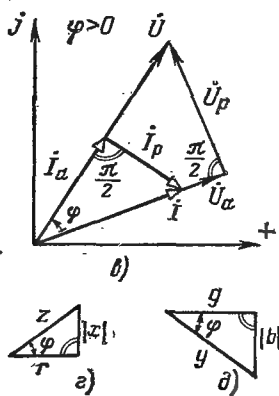
масштабе равны сопротивлениям z , r и $|x|$, есть треугольник сопротивлений (рис. 4-5, з).

Для схемы замещения по рис. 4-5, б

$$\dot{I} = Y \dot{U} = \dot{I}_a + \dot{I}_p,$$

где $\dot{I}_a = g \dot{U}$ — активная составляющая тока; $\dot{I}_p = -jb \dot{U}$ — реактивная составляющая тока.

Значения I_a и I_p можно найти из векторной диаграммы путем построения треугольника токов (рис. 4-5, в). Подобный ему



Активные двухполюсники

Источник электрической энергии, когда известны его ЭДС E или ток короткого замыкания $\dot{I}_k = \dot{J}$ и внутреннее сопротивление $Z_{вт} = r + jx$ или проводимость $Y_{вт} = g - jb$, может быть представлен схемами замещения с источником ЭДС (рис. 4-6, а) или с источником тока (рис. 4-6, б), причем $\dot{J} = E/Z_{вт}$ и $Y_{вт} = 1/Z_{вт}$, где $Z_{вт} = r + jx$, $Y_{вт} = g - jb$ (переход от r и x к g и b и наобо-

рот — см. выше). Если при расчете цепи можно $Z_{вт}$ не учитывать, т. е. положить в схеме рис. 4-6, а $Z_{вт}=0$, то источник энергии заменяется идеальным источником ЭДС $\vec{E}$; если можно $Y_{вт}$ не учитывать, т. е. положить в схеме рис. 4-6, б $Y_{вт}=0$, то источник энергии заменяется идеальным источником тока $\vec{I}$.

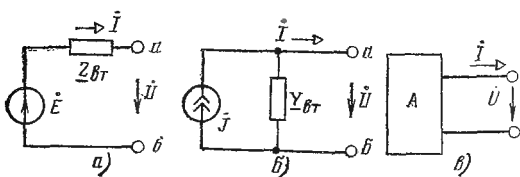


Рис. 4-6.

Для схемы рис. 4-6, а: $\vec{U} = \vec{U}_{аб} = \vec{\Phi}_a - \vec{\Phi}_б = \vec{E} - \vec{I}Z_{вт}$. Для схемы рис. 4-6, б: $\vec{U} = \vec{U}_{аб} = \vec{\Phi}_a - \vec{\Phi}_б = (\vec{I} - \vec{I})Y_{вт}$.

Эти схемы справедливы и для произвольного активного двухполюсника (рис. 4-6, в). В этом случае $\vec{E} = \vec{U}_x$ — напряжение холостого хода на выходах двухполюсника; $Z_{вт} = Z_{вх}$ — входное сопротивление активного двухполюсника, равное сопротивлению соответствующего пассивного двухполюсника (получается, когда ЭДС активного двухполюсника приняты равными нулю, а все ветви с источниками тока разомкнуты).

Взаимная индуктивность

Последовательное включение двух индуктивно связанных катушек (рис. 4-7, а). Общее напряжение

$$u = L_1 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt},$$

где M — взаимная индуктивность.

В комплексной форме

$$\vec{U} = (j\omega L_1 \pm j\omega M + j\omega L_2 \pm j\omega M) \vec{I},$$

где $\omega M = X_M$ — сопротивление взаимной индукции, или

$$\vec{U} = j\omega L \vec{I},$$

где $L = L_1 + L_2 \pm 2M$.

Знак плюс ставится при согласном соединении катушек, знак минус — при встречном.

Согласное соединение получается, когда магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждой катушке суммируются, что указывается на схеме одинаковым направлением тока относительно одноименных выводов (рис. 4-7, б), обозначаемых точками.

Понятие о согласном и встречном включениях обобщают на катушки, включенные в разные ветви, и вообще на кон-

туры, если они имеют индуктивную связь (рис. 4-7, в):

$$\begin{aligned} \vec{U}_1 &= j\omega L_1 \vec{I}_1 + j\omega M \vec{I}_2; & \vec{U}_2 &= j\omega L_2 \vec{I}_2 + j\omega M \vec{I}_1; \\ \vec{U}_3 &= j\omega L_3 \vec{I}_3 - j\omega M \vec{I}_4; & \vec{U}_4 &= j\omega L_4 \vec{I}_4 - j\omega M \vec{I}_3. \end{aligned}$$

Стрелки на схемах показывают выбранные произвольно положительные направления токов и напряжений.

После выбора положительных направлений слагаемые вида $j\omega L_k \vec{I}_k$ и $j\omega M \vec{I}_n$ суммируются, если выбранные токи одинаково направлены относительно одноименных выводов (обозначенных точками), и вычитаются в противном случае. Активные сопротивления катушек учитываются так же, как и при отсутствии индуктивной связи между катушками.

Схему цепи, содержащей две катушки, обладающие взаимной индуктивностью и присоединенные к одному и тому же узлу, можно заменить схемой цепи, не содержащей катушек со взаимной индуктивностью (рис. 4-7, г).

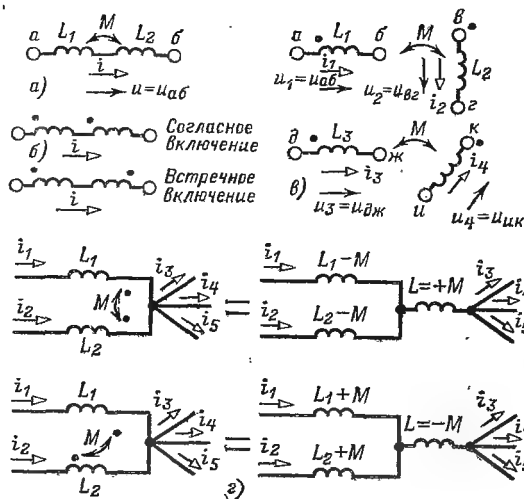


Рис. 4-7.

Мощность

Мгновенная мощность любого участка цепи или двухполюсника определяется как произведение мгновенных значений напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \beta)$ и тока $i = I_m \times \sin(\omega t + \alpha)$:

$$p = ui = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \psi),$$

где $\varphi = \beta - \alpha$; $\psi = \beta + \alpha$.

Среднее значение мощности или активная мощность произвольного активного или пассивного двухполюсника

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi.$$

Здесь U и I — напряжение и ток на выводах двухполюсника; φ — угол сдвига фаз между напряжением и током. Положительные направления напряжений и тока пассивного двухполюсника должны быть взяты, как на рис. 4-4, а, активного двухполюсника — как на рис. 4-6.

$S = UI$ — полная мощность; $P/S = \cos \varphi$ — коэффициент мощности; $Q = UI \sin \varphi$ — реактивная мощность;

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = Q/P.$$

Мощность в комплексной форме

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{U} \underline{I}^* = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi,$$

где $\underline{S}$ — полная мощность в комплексной форме; $\underline{I}^* = I \angle -\alpha$ — сопряженный комплексный ток и $S = |\underline{S}|$.

Иногда принимают

$$\underline{S} = \underline{U}^* \underline{I} = P - jQ,$$

где $\underline{U}^* = U \angle -\beta$ — сопряженное комплексное напряжение.

Для пассивных двухполюсников и их схем замещения (см. рис. 4-5)

$$S = UI = zI^2 = yU^2; \quad P = UI \cos \varphi =$$

$$= U_a I = U_a I_a = rI^2 = gU^2;$$

$$Q = UI \sin \varphi = xI^2 = bU^2; \quad |Q| = U_p I = U I_p.$$

При $\varphi > 0$ (рис. 4-5, в) $Q > 0$, при $\varphi < 0$ и $Q < 0$.

Закон Джоуля—Ленца. В активных сопротивлениях электрической цепи мгновенная мощность $p = ri^2 = ui$.

Активная мощность

$$P = UI = rI^2 = rI_m^2/2 = U^2/r = U_m^2/2r.$$

Мощность источников. Мощность, развиваемая источником ЭДС (рис. 4-6, а),

$$\underline{S}_{\Pi} = P_{\Pi} + jQ_{\Pi} = \underline{E} \underline{I}^*.$$

Мощность, развиваемая источником тока (рис. 4-6, б),

$$\underline{S}_{\Pi} = P_{\Pi} + jQ_{\Pi} = \underline{U} \underline{I}^*.$$

В любом случае (рис. 4-6) мощность, отдаваемая во внешнюю часть цепи,

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ; \quad S = UI,$$

т. е. одинакова, но мощности, развиваемые источниками ЭДС и тока, различны.

Баланс мощности. Для электрической цепи справедлив закон:

$$\Sigma P_{\text{источников}} = \Sigma P_{\text{приемников}};$$

$$\Sigma Q_{\text{источников}} = \Sigma Q_{\text{приемников}} \quad \text{или}$$

$$\Sigma \underline{S}_{\text{источников}} = \Sigma \underline{S}_{\text{приемников}};$$

Указанные равенства являются следствием закона сохранения энергии и могут служить одним из средств проверки правильности расчета.

«Активная» энергия W_a и «реактивная» энергия W_p , определяющая реактивную мощность приемника или источника, в течение времени t :

$$W_a = \int_0^t P dt; \quad W_p = \int_0^t Q dt.$$

Схемы электрических цепей и их графы

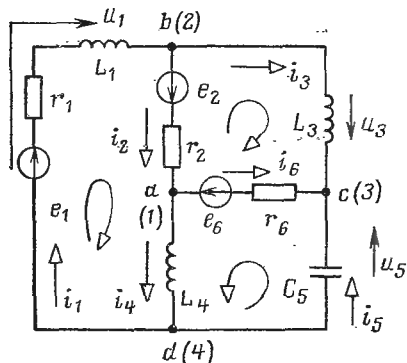
Схема электрической цепи, состоящей из пассивных и активных двухполюсников, содержащий пассивные элементы (резистивные, индуктивные, емкостные) и активные элементы (источники ЭДС и тока). Участок электрической цепи, состоящей только из последовательно соединенных элементов (с одним и тем же током), образует ветвь; направление ветви в топологическом смысле совпадает с выбранным положительным направлением тока ветви. Точка соединения ветвей образует узел. Например, схема цепи, изображенная на рис. 4-8, а, состоит из шести ветвей, которые соединены в четырех узлах: a , b , c и d .

Условное изображение схемы, в котором каждая ветвь заменена отрезком линии, называется графом схемы. Граф тоже состоит из ветвей и узлов и для одной и той же схемы может быть изображен различными способами. Например, для схемы по рис. 4-8, а на рис. 4-8, б показаны два из различных возможных изображений графа. Топологические (геометрические) свойства для всех изображений одинаковы: существует взаимно однозначное соответствие между узлами и ветвями, т. е. такие графы изоморфны. Например, для всех изображений узлы b и d соединены ветвью 1. Часть графа образует подграф: путь, контур, дерево, связь, сечение. Путь — это упорядоченная последовательность ветвей, в которой каждые две соседние ветви имеют общий узел, причем входящие в путь ветви и узлы встречаются только 1 раз (например, на рис. 4-8, б ветви 1—3—6). Контур — замкнутый путь, в котором один из узлов — и начало и конечный пути (например, на рис. 4-8, б ветви 1—3—5). У связанного графа между любой парой узлов существует путь. Дерево — связанного графа называется связный подграф, содержащий все узлы, но ни одного контура. Например, на рис. 4-8, в показаны два дерева графа по рис. 4-8, б. Для схем, имеющих форму полного многоугольника с n узлами, число деревьев равно n^{n-2} ; например, для мостовой схемы рис. 4-8, а получается $4^2 = 16$ деревьев. Связи графа дополняют дерево до исходного графа. Для деревьев на рис. 4-8, в связи даны на рис. 4-8, г.

Если граф (схема) имеет v ветвей и y

узлов, то любое дерево содержит $\delta = y - 1$ ветвей; число связей $\kappa = e - (y - 1)$.

Сечением называется множество ветвей, удаление которых делит граф (схему) на два изолированных подграфа (подсхемы), один из которых в частном случае может быть изолированным узлом. Так, на



а)

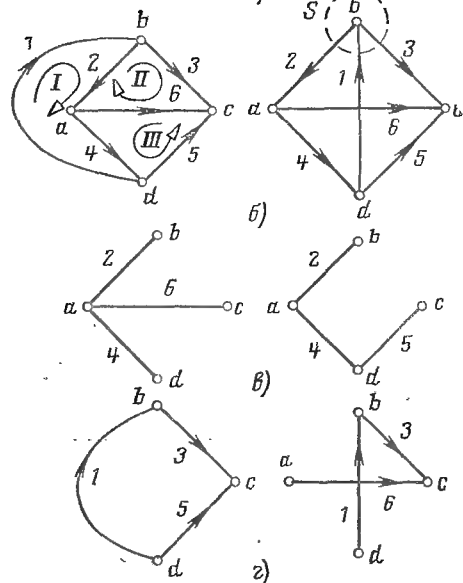


Рис. 4-8.

рис. 4-8, б показана пунктиром поверхность S , рассекающая граф на две части. Число главных контуров, каждый из которых состоит из ветвей дерева и одной из связей, тоже равно κ . Главное сечение состоит из связи и одной ветви дерева. Их число равно δ .

Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа. При произвольно выбранных положительных направлениях токов во всех ветвях алгебраическая сумма мгновенных значений или комп-

лексных токов ветвей, присоединенных к узлу, равна нулю:

$$\sum_k i_k = 0; \quad \sum_k \dot{I}_k = 0,$$

где $k=1, 2, \dots, n$ (n — число ветвей, сходящихся в узле).

При составлении уравнений токи, направленные от узла, записываются со знаком плюс, а направленные к узлу — со знаком минус (или наоборот). Например, для узла b (рис. 4-8, а)

$$-i_1 + i_2 + i_3 = 0; \quad \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0.$$

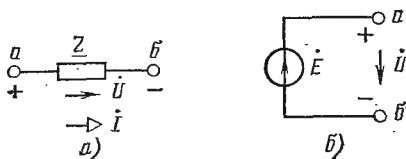


Рис. 4-9.

Второй закон Кирхгофа. При положительном направлении напряжения каждой k -й ветви $u_k^{(b)}$, совпадающем с положительным направлением тока i этой ветви, для любого контура

$$\sum_k u_k^{(b)} = 0; \quad \sum_k \dot{U}_k^{(b)} = 0,$$

где со знаком плюс записываются напряжения, направления которых совпадают с направлением обхода этого контура, и со знаком минус — противоположно направлению. Например, для контура, состоящего из ветвей 1, 3, 5 на рис. 4-8, а,

$$u_1^{(b)} + u_3^{(b)} - u_5^{(b)} = 0;$$

$$\dot{U}_1^{(b)} + \dot{U}_3^{(b)} - \dot{U}_5^{(b)} = 0.$$

Второй закон Кирхгофа можно записать и через напряжения на отдельных элементах схемы. Принимая всегда для пассивных элементов $\dot{U} = \dot{U}_{ab} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b = \dot{Z}I$ (рис. 4-9, а), т. е. положительное направление напряжения совпадающим с положительным направлением тока, а для активных элементов $\dot{U} = \dot{U}_{ab} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b = \dot{E}$ (рис. 4-9, б), т. е. положительное направление напряжения от положительного зажима к отрицательному, получим, что алгебраическая сумма мгновенных или комплексных напряжений на m пассивных и активных элементах контура равна нулю:

$$\sum_m u_m = 0; \quad \sum_m \dot{U}_m = 0.$$

Если напряжения источников перенести в правую часть уравнений и заменить ЭДС, то

$$\sum_n u_n = \sum_n e_n; \quad \sum_n \dot{U}_n = \sum_n \dot{E}_n.$$

Здесь напряжения (падения напряжения) и ЭДС записываются со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением обхода вдоль контура, и со знаком минус в противоположном случае. Например, для контура, состоящего из ветвей 1, 3, 5 на рис. 4-8, а (обход по часовой стрелке),

$$u_{r1} + u_{L1} + u_{L3} - u_{C5} = e_1$$

или

$$r_1 i_1 + L_1 di_1/dt + L_3 di_3/dt - \frac{1}{C_5} \int i_5 dt = e_1;$$

$$r_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega L_3 \dot{I}_3 - \frac{1}{j\omega C_5} \dot{I}_5 = \dot{E}_1.$$

Специальных стрелок для положительных направлений падений напряжения можно не ставить, если для пассивных элементов всегда принимать, что $\dot{U} = \underline{Z}\dot{I}$, т. е.

$$\dot{U} = \dot{U}_{ab} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b = \underline{Z} \dot{I} \quad (\text{рис. 4-9, а}),$$

где $\dot{\varphi}_a$ и $\dot{\varphi}_b$ — комплексные потенциалы (под комплексным потенциалом понимают комплексное напряжение между данной точкой и точкой, потенциал которой принят за нулевой). Напряжения, уравнивающие ЭДС взаимной индукции, записываются с тем же знаком, что и падения напряжения на соответствующих индуктивных элементах, при «согласном» включении и с обратным знаком при «встречном» включении.

Пример (рис. 4-10, а)

$$-\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0; \quad r \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 = \dot{E}_1;$$

$$j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}_1 + \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_2 - j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = -\dot{E}_2.$$

Обобщенный закон Ома. Ток в какой-либо ветви определяется через разность потенциалов (напряжение) на концах ветви, ЭДС источников, включенных в эту ветвь, и сопротивление Z или проводимость $Y = 1/Z$ ветви (рис. 4-11, а) по формуле

$$\begin{aligned} \dot{I} &= Y (\dot{U}_{ab} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2) = \\ &= \frac{\dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b + \dot{E}_1 - \dot{E}_2}{Z}. \end{aligned}$$

Правило знаков ясно из рис. 4-11, а. Индуктивные связи с другими ветвями должны отсутствовать.

Распределение тока в параллельных ветвях. В двух параллельных ветвях, не содержащих источников электрической энергии и ЭДС индукции, токи распределяются обратно пропорционально сопротивлениям ветвей (рис. 4-11, б):

$$\dot{I}_1 = \dot{I} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad \dot{I}_2 = \dot{I} \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2},$$

или

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_{22}/\xi; \quad \dot{I}_2 = \dot{U}_{21}/\xi,$$

где

$$\xi = Z_1 Z_2 + Z Z_1 + Z Z_2,$$

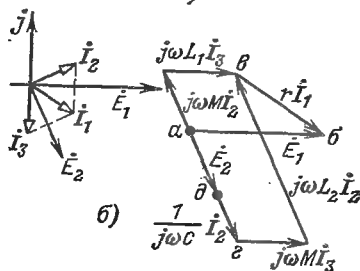
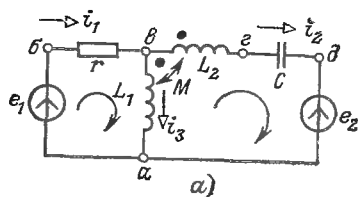


Рис. 4-10.

При трех параллельных ветвях с сопротивлениями Z_1 , Z_2 и Z_3

$$\dot{I}_1 = \dot{I} \frac{Z_2 Z_3}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1};$$

токи $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$ определяются аналогично (круговой заменой индексов).

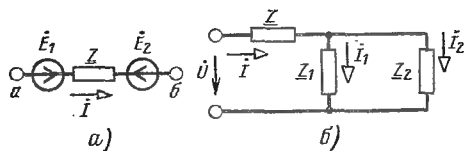


Рис. 4-11.

В случае произвольного числа параллельных ветвей (при отсутствии индуктивных связей) для вычисления тока в одной из них целесообразно пользоваться общей формулой

$$\dot{I}_k = \dot{I} Y_k / Y,$$

где $\dot{I}_k$ — ток в k -й ветви; Y_k — проводимость k -й ветви; Y — сумма проводимостей всех ветвей.

Топографические векторные диаграммы

Потенциал каждой точки электрической цепи может быть представлен соответствующей точкой на комплексной плоскости, так что разность потенциалов между какими-либо двумя точками a и b цепи вы-

ражается вектором, соединяющим соответствующие две точки на плоскости. При этом вектор $\varphi_a - \varphi_b = \dot{U}_{ab}$ строится по обычному правилу вычитания векторов. Его началом является точка b , концом (стрелка) — точка a .

Совокупность векторов напряжений и ЭДС, построенных на комплексной плоскости по этим правилам, образует топографическую диаграмму.

Пример. См. схему на рис. 4-10, a и топографическую диаграмму на рис. 4-10, b .

Резонанс напряжений и резонанс токов

Резонанс напряжений. Резонанс напряжений в двухполюснике (последовательный резонанс) наступает в том случае, когда

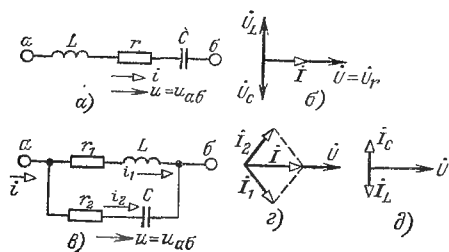


Рис. 4-12.

комплексное сопротивление двухполюсника $\underline{Z}$ чисто активное ($x=0$).

В простейшем случае резонанс напряжений возможен в двухполюснике (ветви), содержащей последовательно включенные элементы с параметрами r , L , C (рис. 4-12, a):

$$\underline{Z} = r + j(x_L - x_C).$$

При резонансе

$$x_L = \omega L = x_C = 1/\omega C,$$

ток в фазе с общим напряжением

$$\dot{I} = \dot{U}/\underline{Z} = \dot{U}/r,$$

напряжения на индуктивном и на емкостном элементах равны по значению:

$$U_L = U_C,$$

напряжение на резистивном элементе U_r равно напряжению U между концами ветви: $U_r = U$ (рис. 4-12, b).

Резонанс можно получить, изменяя L , C или частоту ω . При резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ получается:

$$\omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C} = \rho.$$

Величина $Q = \rho/r$ — добротность характеризует резонансные свойства двухполюсника. Чем больше Q , тем больше U_L , U_C , I при резонансе:

$$U_L = U_C = QU; \quad I = QU/\rho.$$

Резонансные кривые

$$I = \frac{U}{r\sqrt{1+Q^2(k-1/k)^2}};$$

$$U_C = \frac{UQ}{k\sqrt{1+Q^2(k-1/k)^2}};$$

$$U_L = \frac{kUQ}{\sqrt{1+Q^2(k-1/k)^2}};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = Q(k-1/k),$$

где $k = \omega/\omega_0$.

Резонанс токов. Резонанс токов в двухполюснике (параллельный резонанс) наступает в том случае, когда комплексная проводимость двухполюсника $\underline{Y}$ является чисто активной ($b=0$).

В простейшем случае резонанс токов возможен в двухполюснике, состоящем из двух параллельных ветвей (рис. 4-12, c), в одной из которых последовательно включены элементы с параметрами r_1 и L , а в другой — с параметрами r_2 и C . В этом случае

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = g_1 - jb_1 + g_2 - jb_2;$$

$$g_1 = r_1/z_1^2;$$

$$b_1 = x_L/z_1^2; \quad g_2 = r_2/z_2^2; \quad b_2 = -x_C/z_2^2,$$

где

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_L^2}; \quad z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_C^2}.$$

При резонансе $b = b_1 + b_2 = 0$, т. е. $\dot{I} = (g_1 + g_2)\dot{U}$ (общий ток в фазе с напряжением — рис. 4-12, d).

Резонанс можно получить, изменяя L , C , r_1 , r_2 или частоту ω . При резонансе

$$\omega = \omega_0' = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{(\rho^2 - r_1^2)/(\rho^2 - r_2^2)}.$$

Если взять $r_1 = r_2 = \sqrt{L/C} = \rho$, то при любой частоте общий ток оказывается в фазе с напряжением (непрерывный резонанс).

В идеальном контуре (рис. 4-12, e , при $r_1 = r_2 = 0$) резонансная частота $\omega_0' = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ и при резонансе $I_C = I_L$ и $I = 0$ (рис. 4-12, d); при любой частоте:

$$I_L = \frac{U}{k\rho}; \quad I_C = \frac{Uk}{\rho};$$

$$I = \frac{U}{\rho} \left| k - \frac{1}{k} \right|,$$

где $k = \omega/\omega_0$.

Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей

Если в электрической цепи известны все ЭДС и сопротивления, то можно рассчитать токи во всех ветвях, основываясь на законах Кирхгофа. Чтобы получить независимую систему уравнений, достаточно составить по первому закону Кирхгофа уравнения для всех узлов или главных сечений, кроме одного, т. е. $\partial = y - 1$ уравнений, а по второму закону — уравнения для всех главных контуров, т. е. $\kappa = \partial - (y - 1)$. В частности, для планарных схем (не содержащих пересекающихся ветвей) независимые уравнения по второму закону получаются, если их составить для всех ячеек. Так, на рис. 4-8, а — три ячейки, состоящие соответственно из ветвей 1, 2, 4; 2, 3, 6 и 4, 6, 5.

Пример (рис. 4-8, а). По первому закону Кирхгофа для узлов а, б, с имеем три ($\partial = 4 - 1$) уравнения:

$$-i_2 + i_4 + i_6 = 0; \quad -i_1 + i_2 + i_3 = 0; \\ -i_3 - i_6 - i_6 = 0.$$

По второму закону Кирхгофа для трех ячеек — контуров три ($\kappa = 6 - (4 - 1)$) уравнения (связи графа выбраны, как показано в левой части рис. 4-8, в):

$$(r_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1 + r_2 \dot{I}_2 + j\omega L_4 \dot{I}_4 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2; \\ -r \dot{I}_2 + j\omega L_3 \dot{I}_3 - r_6 \dot{I}_6 = \dot{E}_6 - \dot{E}_3; \\ j\omega L_4 \dot{I}_4 - j \frac{1}{\omega C_6} \dot{I}_6 - r_6 \dot{I}_6 = \dot{E}_6.$$

Уравнения Кирхгофа для токов и напряжений можно записать в матричной форме. Различают три топологические матрицы. Матрица соединений (узловая) А — это таблица коэффициентов уравнений, составленных по первому закону для $\partial = y - 1$ узлов. Строки (i) соответствуют узлам, столбцы (j) — ветвям. Элемент матрицы $a_{ij} = 1$ или -1 , если соответственно ветвь j соединена с узлом i и направлена от узла или к узлу; $a_{ij} = 0$, если ветвь j не соединена с узлом i . Например, для схемы рис. 4-8, а или графа рис. 4-8, б (где направления ветвей совпадают с положительными направлениями токов)

$$A = b \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{vmatrix}.$$

Вместо матрицы соединений может быть записана матрица сечений — таблица коэффициентов уравнений, составленных по первому закону для сечений. Если таблица составлена для главных сечений, то это матрица главных сечений.

Матрица контуров В — это таблица коэффициентов уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа. Строки (i) соответствуют контурам, столбцы (j) — ветвям; число строк равно числу независимых контуров κ . Элемент матрицы $b_{ij} = 1$

или -1 , если соответственно ветвь j есть в контуре i и ее направление совпадает или противоположно направлению обхода; $b_{ij} = 0$, если ветвь j нет в контуре i . Направление обхода контура совпадает с направлением связи этого контура. Например, для схемы рис. 4-8, а или графа рис. 4-8, б, выбранное дерево которого дано в левой части рис. 4-8, в, т. е. с ветвями дерева 2, 6, 4 и ветвями связи 1, 3, 5, имеем три контура: I, II, III (рис. 4-8, б). Матрица контуров:

$$B = \begin{vmatrix} I & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ II & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ III & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}.$$

Матрицы-столбцы токов и напряжений всех n ветвей:

$$i = \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_n \end{vmatrix}; \quad u^{(B)} = \begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{vmatrix}.$$

Законы Кирхгофа в матричной форме:

$$A i = 0; \quad B u^{(B)} = 0.$$

Пример (рис. 4-8, а). По первому закону Кирхгофа произведение матрицы А и матрицы-столбца токов i , в которой $n=6$ (ветвей), соответствует трем независимым уравнениям (записаны для мгновенных значений):

$$-i_2 + i_4 + i_6 = 0 \quad (\text{узел } a); \\ -i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (\text{узел } b); \\ -i_3 - i_5 - i_6 = 0 \quad (\text{узел } c).$$

По второму закону произведение матрицы В и матрицы-столбца напряжений ветвей соответствует уравнениям

$$u_1 + u_2 + u_4 = 0 \quad (\text{контур } I); \\ -u_2 + u_3 - u_6 = 0 \quad (\text{контур } II); \\ u_4 + u_5 - u_6 = 0 \quad (\text{контур } III)$$

или, так как

$$u_1 = -e_1 + r_1 i_1 + L_1 di_1/dt; \quad u_2 = -e_2 + r_2 i_2; \\ u_3 = L_3 di_3/dt;$$

$$u_4 = L_4 di_4/dt; \quad u_5 = \frac{1}{C_6} \int i_5 dt; \quad u_6 = e_6 + r_6 i_6,$$

то

$$r_1 i_1 + L_1 di_1/dt + r_2 i_2 + L_4 di_4/dt = e_1 + e_2; \\ -r_2 i_2 + L_3 di_3/dt - r_6 i_6 = e_6 - e_2; \\ L_4 di_4/dt + \frac{1}{C_6} \int i_5 dt - r_6 i_6 = e_6.$$

Если схема содержит идеальные источники тока, то $y-1$ уравнений по первому закону Кирхгофа составляются по тем же правилам. Уравнения по второму закону для контуров, включающих ветви с источниками тока, не составляются. При подсчете необходимого числа уравнений по формуле $\kappa = \partial - (y - 1)$ ветви с источниками тока в число ∂ не входят. Дерево, связи, главные контуры определяются при исключении из схемы ветвей с идеальными источниками тока.

Для цепей, которые имеют индуктивно связанные катушки, в уравнениях по второ-

му закону Кирхгофа должны быть учтены напряжения, компенсирующие ЭДС взаимной индукции.

Пример (рис. 4-10). Схема с двумя узлами (а и в) и двумя контурами-ячейками:

$$-i_1 + i_2 + i_3 = 0; r_1 i_1 + \dot{U}_{ea} = \dot{E}_1;$$

$$\dot{U}_{ea} - j \frac{1}{\omega C} i_2 - \dot{U}_{ea} = -\dot{E}_2,$$

где $\dot{U}_{ea} = j\omega L_1 i_3 + j\omega M i_2$; $\dot{U}_{ea} = j\omega L_2 i_2 + j\omega M i_3$ (слагаемые с взаимной индуктивностью записаны с тем же знаком, что и слагаемые с индуктивностями, так как токи направлены одинаково относительно одноименных выводов катушек).

входящих в контур i ; каждый внедиагональный элемент (или общее контурное сопротивление) Z_{ij} равен сопротивлению ветви, общей для контуров i и j , и записывается со знаком плюс (минус), если контурные токи направлены в общей ветви одинаково (противоположно). Элемент $E_i^{(K)}$ матрицы контурных ЭДС равен алгебраической сумме ЭДС источников i -го контура; со знаком плюс (минус) записываются ЭДС, направление которых совпадает (противоположно) с направлением контурного тока.

Пример. Для схемы рис. 4-8, а

$$\underline{Z}^{(K)} = \begin{bmatrix} (r_1 + j\omega L_1 + r_2 + j\omega L_4) & -r_2 & j\omega L_4 \\ -r_2 & (r_2 + j\omega L_3 + r_6) & r_6 \\ j\omega L_4 & r_6 & (j\omega L_4 - j \frac{1}{\omega C_5} + r_6) \end{bmatrix};$$

Метод контурных токов

$$\underline{\dot{I}}^{(K)} = \begin{bmatrix} \dot{I}_I \\ \dot{I}_{II} \\ \dot{I}_{III} \end{bmatrix}; \underline{\dot{E}}^{(K)} = \begin{bmatrix} \dot{E}_1 + \dot{E}_2 \\ \dot{E}_6 - \dot{E}_2 \\ \dot{E}_6 \end{bmatrix}.$$

Принимая, что в каждом контуре, для которого составлялись уравнения по второму закону Кирхгофа, есть контурный ток, направление которого совпадает с направлением обхода контура, нужно составить такое же число уравнений и с тем же правилом знаков, что и при записи уравнений по второму закону Кирхгофа.

Пример (рис. 4-8, а). Система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Z_{11} i_1 + Z_{12} i_{II} + Z_{13} i_{III} &= \dot{E}_I; \\ Z_{21} i_1 + Z_{22} i_{II} + Z_{23} i_{III} &= \dot{E}_{II}; \\ Z_{31} i_1 + Z_{32} i_{II} + Z_{33} i_{III} &= \dot{E}_{III}. \end{aligned} \right\}$$

где $Z_{11} = r_1 + j\omega L_1 + r_2 + j\omega L_4$; $Z_{12} = Z_{21} = -r_2$

(так как контурные токи i_I и i_{II} в элементе с сопротивлением r_2 направлены противоположно);

$$Z_{13} = Z_{31} = j\omega L_4; Z_{22} = r_2 + j\omega L_3 + r_6;$$

$$Z_{23} = Z_{32} = r_6; Z_{33} = j\omega L_4 - j/\omega C_5 + r_6;$$

$$\dot{E}_I = \dot{E}_1 + \dot{E}_2; \dot{E}_{II} = -\dot{E}_2 + \dot{E}_6; \dot{E}_{III} = \dot{E}_6.$$

Токи в ветвях:

$$i_1 = i_I; i_2 = i_I - i_{II}; i_3 = i_{II};$$

$$i_4 = i_I + i_{III}; i_5 = i_{III}; i_6 = -i_{II} - i_{III}.$$

Контурные уравнения записываются короче в матричной форме

$$\underline{Z}^{(K)} \dot{\underline{I}}^{(K)} = \underline{\dot{E}}^{(K)},$$

где $\dot{\underline{I}}^{(K)}$ — матрица-столбец искомых контурных токов; $\underline{Z}^{(K)}$ — квадратная матрица контурных сопротивлений; $\underline{\dot{E}}^{(K)}$ — матрица-столбец контурных ЭДС. Каждый диагональный элемент (или собственное контурное сопротивление Z_{ii} матрицы $\underline{Z}^{(K)}$ равен сумме комплексных сопротивлений ветвей,

Токи в ветвях $\dot{\underline{I}} = \mathbf{B}^T \dot{\underline{I}}^{(K)}$, где $\mathbf{B}^T$ — транспонированная матрица $\mathbf{B}$.

Если схема содержит источники тока, то следует учесть замечания, сделанные выше относительно составления уравнений по второму закону Кирхгофа для схемы с источниками тока.

Матрицу контурных сопротивлений $\underline{Z}^{(K)}$ можно получить и при помощи матрицы контуров $\mathbf{B}$:

$$\underline{Z}^{(K)} = \underline{\mathbf{B}} \underline{\mathbf{Z}}^{(B)} \mathbf{B}^T,$$

где $\underline{\mathbf{Z}}^{(B)}$ — диагональная матрица сопротивлений ветвей.

Пример. Для схемы рис. 4-8, а матрица $\mathbf{B}$ была получена при составлении уравнений Кирхгофа:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Диагональная матрица сопротивлений ветвей (рис. 4-8, а)

$$\underline{\mathbf{Z}}^{(B)} = \begin{bmatrix} (r_1 + j\omega L_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j\omega L_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j\omega L_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -j/\omega C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_6 \end{bmatrix}.$$

Произведение

$$\underline{\mathbf{B}} \underline{\mathbf{Z}}^{(B)} = \begin{bmatrix} (r_1 + j\omega L_1) & r_2 & 0 & j\omega L_4 & 0 & 0 \\ 0 & -r_2 & j\omega L_3 & 0 & 0 & -r_6 \\ 0 & 0 & 0 & j\omega L_4 & -j/\omega C_5 & -r_6 \end{bmatrix}.$$

Транспонированная матрица

$$\mathbf{B}^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix},$$

и для $\underline{\mathbf{z}}^{(k)} = \underline{\mathbf{B}}\underline{\mathbf{z}}^{(b)} \mathbf{B}^T$ получается ранее записанная матрица.

Матрицу-столбец контурных ЭДС можно составить, применяя формулу

$$\dot{\mathbf{E}}^{(k)} = \mathbf{B} \dot{\mathbf{E}}^{(b)} - \underline{\mathbf{B}}\underline{\mathbf{z}}^{(b)} \mathbf{j}^{(b)},$$

где $\dot{\mathbf{I}}^{(b)}$ — матрица-столбец токов источников тока.

Для цепей, которые имеют индуктивно связанные катушки, взаимные индуктивности учитываются в контурных сопротивлениях или уравнения записываются после устранения индуктивных связей.

Пример (рис. 4-10, а). Для контурных токов $\dot{I}_1 = \dot{I}_1$ и $\dot{I}_{II} = \dot{I}_2$ система уравнений:

$$\underline{Z}_{11} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{12} \dot{I}_2 = \dot{E}_1; \quad \underline{Z}_{21} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{22} \dot{I}_2 = -\dot{E}_2,$$

где $\underline{Z}_{11} = r_1 + j\omega L_1$; $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = -j\omega L_1 + j\omega M$,

$$\underline{Z}_{22} = j\omega L_2 - j\omega C - j\omega M + j\omega L_1 - j\omega M$$

(так как контурный ток $\dot{I}_{II}$ направлен в катушках относительно одноименных выводов по-разному).

Метод узловых потенциалов

Для определения потенциалов всех узлов нужно составить систему уравнений по первому закону Кирхгофа для всех узлов, кроме одного, записывая каждый ток по формуле обобщенного закона Ома и принимая потенциал одного из узлов за нулевой. Получается система уравнений для потенциалов.

Пример (рис. 4-8, а). Схема имеет четыре узла. Выбирая, например, $\dot{\varphi}_d = \dot{\varphi}_4 = 0$, запишем уравнения по первому закону Кирхгофа для трех любых узлов, например, остальных:

$$-\dot{I}_2 + \dot{I}_4 + \dot{I}_6 = 0; \quad -\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0;$$

$$-\dot{I}_3 - \dot{I}_6 - \dot{I}_8 = 0$$

и по обобщенному закону Ома

$$-\frac{1}{r_2}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1 + \dot{E}_2) + \frac{1}{j\omega L_4}(\dot{\varphi}_1 - 0) +$$

$$+ \frac{1}{r_6}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3 - \dot{E}_6) = 0;$$

$$-\frac{1}{r_1 + j\omega L_1}(0 - \dot{\varphi}_2 + \dot{E}_1) + \frac{1}{r_2}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1 + \dot{E}_2) +$$

$$+ \frac{1}{j\omega L_3}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = 0;$$

$$-\frac{1}{j\omega L_3}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - \frac{1}{-j\omega C_5}(0 - \dot{\varphi}_3) -$$

$$-\frac{1}{r_6}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3 - \dot{E}_6) = 0.$$

После вычисления потенциалов $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3$ токи определяются по обобщенному закону Ома. Если какой-либо ток известен, например ток источника тока, то в уравнениях вместо соответствующего слагаемого надо записать этот ток.

Уравнения по методу узловых потенциалов для каждого k -го из $y-1$ узлов могут быть записаны в виде

$$\sum_{m=1}^{y-1} \underline{Y}_{km} \dot{\varphi}_m = \sum_k (\underline{Y} \dot{E}),$$

где $\underline{Y}_{km}$ — сумма проводимостей ветвей, соединяющих узлы k и m , взятая со знаком минус; $\underline{Y}_{kk}$ — сумма проводимостей ветвей,

присоединенных к узлу k ; $\sum_k (\underline{Y} \dot{E})$ — ал-

гебраическая сумма произведений ЭДС на проводимость для всех ветвей, присоединенных к k -му узлу; со знаком плюс (минус) записываются ЭДС, направленные к узлу (от узла).

Пример (рис. 4-8, а). При $\dot{\varphi}_4 = 0$ для узлов 1, 2, 3 соответственно

$$\underline{Y}_{11} \dot{\varphi}_1 + \underline{Y}_{12} \dot{\varphi}_2 + \underline{Y}_{13} \dot{\varphi}_3 = \sum_1 (\underline{Y} \dot{E});$$

$$\underline{Y}_{21} \dot{\varphi}_1 + \underline{Y}_{22} \dot{\varphi}_2 + \underline{Y}_{23} \dot{\varphi}_3 = \sum_2 (\underline{Y} \dot{E});$$

$$\underline{Y}_{31} \dot{\varphi}_1 + \underline{Y}_{32} \dot{\varphi}_2 + \underline{Y}_{33} \dot{\varphi}_3 = \sum_3 (\underline{Y} \dot{E}),$$

где

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_6} + \frac{1}{j\omega L_4}; \quad \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = -\frac{1}{r_2};$$

$$\underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{31} = -\frac{1}{r_6};$$

$$\underline{Y}_{22} = \frac{1}{r_1 + j\omega L_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{j\omega L_3};$$

$$\underline{Y}_{23} = \underline{Y}_{32} = -\frac{1}{j\omega L_3};$$

$$\underline{Y}_{33} = \frac{1}{j\omega L_3} + \frac{1}{-j\omega C_5} + \frac{1}{r_6};$$

$$\sum_1 (\underline{Y} \dot{E}) = \frac{1}{r_2} \dot{E}_2 + \frac{1}{r_6} \dot{E}_6;$$

$$\sum_2 (\underline{Y} \dot{E}) = \frac{1}{r_1 + j\omega L_1} \dot{E}_1 - \frac{1}{r_2} \dot{E}_2;$$

$$\sum_3 (\underline{Y} \dot{E}) = -\frac{1}{r_6} \dot{E}_6.$$

Узловые уравнения записываются коротко в матричной форме:

$$\underline{\mathbf{Y}}^{(y)} \dot{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{j}^{(y)},$$

где $\dot{\boldsymbol{\varphi}}$ — матрица-столбец искомого потенциалов узлов (кроме одного — базисного, потенциал которого принят равным нулю); $\underline{\mathbf{Y}}^{(y)}$ — квадратная матрица узловых проводимостей; $\mathbf{j}^{(y)}$ — матрица-столбец узловых

токов. Каждый диагональный элемент (или собственная узловая проводимость) $\underline{Y}_{ii}$ матрицы $\underline{Y}^{(v)}$ равен сумме комплексных проводимостей всех ветвей, присоединенных к этому узлу (i); каждый внедиагональный элемент (или общая узловая проводимость) $\underline{Y}_{ij} = \underline{Y}_{ji}$ равен сумме комплексных проводимостей всех ветвей, соединяющих узлы i и j , и записывается со знаком минус. Элемент $\underline{j}_i^{(v)}$ матрицы узловых токов равен алгебраической сумме токов источников тока, эквивалентных источникам ЭДС в ветвях, присоединенных к узлу i . Направленные к узлу (от узла) токи записываются со знаком плюс (минус). Знаки элементов всех матриц не зависят от ориентации ветвей графа.

Пример. Для схемы рис. 4-8, а, принимая $\dot{\varphi}_d = \dot{\varphi}_a = 0$,

$$\underline{Y}^{(v)} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & -\frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_6} \\ -\frac{1}{r_2} & \underline{Y}_{22} & -\frac{1}{j\omega L_3} \\ -\frac{1}{r_6} & -\frac{1}{j\omega L_3} & \underline{Y}_{33} \end{bmatrix},$$

где

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_6} + \frac{1}{j\omega L_1};$$

$$\underline{Y}_{22} = \frac{1}{r_1 + j\omega L_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{j\omega L_3};$$

$$\underline{Y}_{33} = \frac{1}{j\omega L_3} + \frac{1}{r_6} + \frac{1}{-j\omega C_5};$$

$$\dot{\varphi} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dot{\varphi}_3 \end{bmatrix};$$

$$\underline{j}^{(v)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_2} \dot{E}_2 + \frac{1}{r_6} \dot{E}_r \\ \frac{1}{r_1 + j\omega L_1} \dot{E}_1 - \frac{1}{r_2} \dot{E}_2 \\ -\frac{1}{r_6} \dot{E}_r \end{bmatrix}.$$

Если в какой-либо ветви известен ток, например ток источника тока, то в левых частях уравнений слагаемое с проводимостью этой ветви должно отсутствовать. В правых частях уравнений нужно добавить известный ток со знаком плюс (минус), если он направлен к узлу (от узла).

Матрицу узловых проводимостей $\underline{Y}^{(v)}$ можно получить и при помощи матрицы соединений $\underline{A}$:

$$\underline{Y}^{(v)} = \underline{A} \underline{Y}^{(b)} \underline{A}^T,$$

где $\underline{Y}^{(b)}$ — диагональная матрица проводимостей ветвей.

Пример. Для схемы рис. 4-8, а матрица соединений была получена при составлении уравнений Кирхгофа:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Диагональная матрица проводимостей ветвей

$$\underline{Y}^{(b)} = \begin{bmatrix} 1/(r_1 + j\omega L_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/r_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/j\omega L_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/j\omega L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j\omega C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/r_6 \end{bmatrix}.$$

Произведение

$$\underline{A} \underline{Y}^{(b)} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{r_2} & 0 & \frac{1}{j\omega L_1} & 0 & \frac{1}{r_6} \\ -\frac{1}{r_1 + j\omega L_1} & \frac{1}{r_2} & \frac{1}{j\omega L_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{j\omega L_3} & 0 & -j\omega C_5 & -\frac{1}{r_6} \end{bmatrix}.$$

Транспонированная матрица

$$\underline{A}^T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

и для $\underline{j}^{(v)} = \underline{A} \underline{j}^{(b)} \underline{A}^T$ получается ранее записанная матрица.

Матрицу-столбец узловых токов также можно получить при помощи матрицы соединений $\underline{A}$:

$$\underline{j}^{(v)} = \underline{A} \underline{j}^{(b)} - \underline{A} \underline{Y}^{(b)} \dot{\underline{E}}^{(b)},$$

где $\underline{j}^{(b)}$ — матрица-столбец токов источников тока; $\dot{\underline{E}}^{(b)}$ — матрица-столбец ЭДС в ветвях.

Пример. Для схемы рис. 4-8, а, в которой источники тока отсутствуют, произведение $\underline{A} \underline{Y}^{(b)}$ было уже получено и для

$$\underline{j}^{(v)} = -\underline{A} \underline{Y}^{(b)} \dot{\underline{E}}^{(b)}$$

получается ранее записанная матрица.

Для цепей, содержащих индуктивно связанные ветви, матрица проводимостей ветвей $\underline{Y}^{(b)}$ недиагональная и определяется как обратная матрица сопротивлений ветвей $\underline{Z}^{(b)}$, т. е.

$$\underline{Y}^{(b)} = (\underline{Z}^{(b)})^{-1}.$$

У матрицы $\underline{Z}^{(u)}$ элементы главной диагонали — сопротивления ветвей, а остальные элементы — сопротивления индуктивной связи между соответствующими ветвями (равны нулю, если между соответствующими ветвями нет индуктивной связи). Эти сопротивления $j\omega M_{mn}$ записываются со знаком плюс (минус), если токи в ветвях m и n направлены одинаково (противоположно) относительно одноименных выводов.

Применение топологических методов расчета

При определении потенциалов из узловых уравнений необходимо вычислить определитель $\underline{D}^{(y)}$ матрицы узловых проводимостей $\underline{Y}^{(y)}$. Расчеты упрощаются, если применяется разложение определителя. Разложение по ветви применяется для любой ветви, соединяющей какой-либо узел j с базисным,

$$\underline{D}^{(y)} = \underline{Y}_j \underline{D}_j + \underline{D}^j,$$

где минор $\underline{D}_j$ получается вычеркиванием j -й строки и j -го столбца определителя $\underline{D}^{(y)}$; нижний индекс у минора 1-го слагаемого означает, что j -я ветвь закорочена; определитель $\underline{D}^j$ получается из $\underline{D}^{(y)}$ при $\underline{Y}_j = 0$, т. е. верхний индекс у 2-го слагаемого означает, что та же ветвь разомкнута; так как проводимость $\underline{Y}_j$ входит в элемент $\underline{D}^{(y)}$, стоящий на главной диагонали, то минор равен алгебраическому дополнению (положительно).

Пример. Для схемы рис. 4-8, а при $\Phi_4 = 0$ определитель матрицы узловых проводимостей составляется так же, как матрица узловых проводимостей (см. Метод узловых потенциалов). Разложим определитель относительно ветви с L_4 , присоединенной к базисному узлу 4;

$$\begin{aligned} \underline{D}^{(y)} = \frac{1}{j\omega L_4} & \begin{vmatrix} \left(\frac{1}{r_1 + j\omega L_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{j\omega L_3} \right) & -\frac{1}{j\omega L_3} \\ -\frac{1}{j\omega L_3} & \left(\frac{1}{j\omega L_3} + \frac{1}{-j/\omega C_5} + \frac{1}{r_6} \right) \end{vmatrix} + \\ + & \begin{vmatrix} \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_6} \right) & -\frac{1}{r_2} \\ -\frac{1}{r_2} & \left(\frac{1}{r_1 + j\omega L_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{j\omega L_3} \right) \\ -\frac{1}{r_6} & -\frac{1}{j\omega L_3} \end{vmatrix} = \underline{Y}_4 \underline{D}_4 + \underline{D}^4. \end{aligned}$$

Можно далее разложить, например, $\underline{D}^4$ относительно проводимости 1-й ветви

$$\begin{aligned} \underline{D}^4 = \frac{1}{r_1 + j\omega L_1} & \begin{vmatrix} \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_6} \right) & -\frac{1}{r_2} \\ -\frac{1}{r_2} & \left(\frac{1}{j\omega L_3} + \frac{1}{-j/\omega C_5} + \frac{1}{r_6} \right) \end{vmatrix} + \\ + & \begin{vmatrix} \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_6} \right) & -\frac{1}{r_2} \\ -\frac{1}{r_2} & \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{j\omega L_3} \right) \\ -\frac{1}{r_6} & -\frac{1}{j\omega L_3} \end{vmatrix} = \underline{Y}_1 \underline{D}_1^4 + \underline{D}^{41} \end{aligned}$$

и аналогично можно проделать дальнейшие разложения.

Обобщая, получим общее выражение для разложения определителя по всем ветвям, присоединенным к базисному узлу, т. е. разложение по узлу:

$$\begin{aligned} \underline{D}^{(y)} = \underline{\Sigma} \underline{Y}_i \underline{D}_i + \underline{\Sigma} \underline{Y}_i \underline{Y}_j \underline{D}_{ij} + \\ + \underline{\Sigma} \underline{Y}_i \underline{Y}_j \underline{Y}_k \underline{D}_{ijk} + \dots + \underline{Y}_1 \underline{Y}_2 \dots \underline{Y}_m, \end{aligned}$$

где m — число ветвей, присоединенных к базисному узлу; верхние индексы, указывающие номера разомкнутых ветвей, опущены, так как нижние индексы определяют и закороченные, и разомкнутые ветви. Например, слагаемое $\underline{Y}_i \underline{D}_i$ соответствует схеме с i -й закороченной ветвью и с разомкнутыми остальными ветвями; число таких слагаемых равно m . Слагаемое вида $\underline{Y}_i \underline{Y}_j \underline{D}_{ij}$ соответствует схеме с двумя закороченными ветвями $\underline{Y}_i$ и $\underline{Y}_j$ и остальными разомкнутыми; число таких слагаемых равно числу сочетаний по 2 из m и т. д.

При вычислении определителя $\underline{D}^{(k)}$ матрицы контурных сопротивлений $\underline{Z}^{(k)}$ можно пользоваться аналогичными разложениями для диагональных элементов матрицы:

$$\underline{D}^{(k)} = \underline{Z}_l \underline{D}_l + \underline{D}^l,$$

где минор $\underline{D}_l$ получается вычеркиванием l -й строки и l -го столбца и соответствует электрической схеме, в которой ветвь с сопротивлением $\underline{Z}_l$ разомкнута; определитель $\underline{D}^l$ получается из $\underline{D}^{(k)}$ при $\underline{Z}_l = 0$.

Пример. Для схемы рис. 4-8, а определить $\underline{D}^{(k)}$ составляется так же, как матрица контурных сопротивлений (см. Метод контурных токов). При разложении относительно ветви с сопротивлением r_6

$$\underline{D}^{(k)} = r_6 \begin{vmatrix} (r_1 + j\omega L_1 + r_2 + j\omega L_4) & -r_2 \\ -r_2 & (r_2 + j\omega L_3 + r_6) \end{vmatrix} + \\ + \begin{vmatrix} (r_1 + j\omega L_1 + r_2 + j\omega L_4) & -r_2 & j\omega L_4 \\ -r_2 & (r_2 + j\omega L_3 + r_6) & r_6 \\ j\omega L_4 & r_6 & (j\omega L_4 - i \frac{1}{\omega C_6}) \end{vmatrix} = r_6 \underline{D}_6 + \underline{D}_6^c;$$

дальнейшие разложения аналогичны.

Взаимная эквивалентная замена источников тока и ЭДС

В любой ветви a , соединяющей два узла 1 и 2, ЭДС E_a можно заменить узловым током (током источника) $\dot{J}$. Ток источника

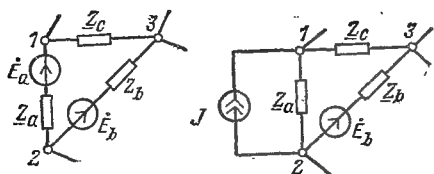


Рис. 4-13.

направлен к тому из узлов (J), в сторону которого действует ЭДС (рис. 4-13): $\dot{J} = \underline{Y}_a \dot{E}_a$, где $\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a$ — проводимость ветви a .

Метод активного двухполюсника

1. Ток в любой ветви (рис. 4-14, а)

$$\dot{I} = \dot{U}_x / (\underline{Z} + \underline{Z}_{\text{вх}}),$$

где $\underline{Z}$ — сопротивление ветви; $\dot{U}_x = \dot{U}_{a6} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_6$ — напряжение при отключении ветви с сопротивлением $\underline{Z}$, в которой определяется ток; $\underline{Z}_{\text{вх}}$ — входное сопротивление

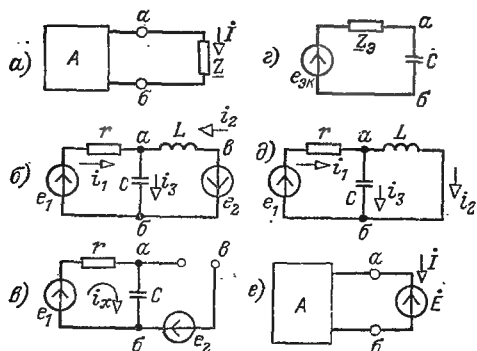


Рис. 4-14.

двухполюсника, т. е. сопротивление всей цепи, кроме ветви, в которой определяется ток, измеренное на выводах ab , когда все ЭДС приняты равными нулю, а все ветви

с источниками тока разомкнуты. При $\underline{Z} = 0$

$$\dot{I} = \dot{I}_k = \dot{U}_x / \underline{Z}_{\text{вх}}; \quad \underline{Z}_{\text{вх}} = \dot{U}_x / \dot{I}_k,$$

где $\dot{I}_k$ — ток короткого замыкания ветви.

Пример (рис. 4-14, б). Определяется ток $\dot{I}_2$. Сначала находим $\dot{U}_x = \dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_a$ при разомкнутом участке ab (рис. 4-14, в). Чтобы найти $\dot{\varphi}_6$, вычислим ток:

$$\dot{I}_x = \dot{E}_1 / (r - jx_C).$$

Пусть $\dot{\varphi}_a = 0$, тогда $\dot{\varphi}_6 = -\dot{I}_x (-jx_C)$;

$$\dot{\varphi}_6 = \dot{\varphi}_6 - \dot{E}_2; \quad \dot{U}_x = jx_C \dot{I}_x - \dot{E}_2.$$

Входное сопротивление относительно точек ab и ток $\dot{I}_2$:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{r(-jx_C)}{r - jx_C}; \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_x}{\underline{Z}_{\text{вх}} + jx_L}.$$

2. Параллельные, содержащие источники ЭДС ветви могут быть заменены одним источником ЭДС и одним сопротивлением по формулам

$$\dot{E}_{\text{эк}} = \frac{\sum \dot{E}_k Y_k}{\sum Y_k}; \quad \frac{1}{\underline{Z}_{\text{эк}}} = Y_{\text{эк}} = \sum Y_k,$$

где $k=1, 2, \dots, n$ (n — число параллельных ветвей).

ЭДС, положительные направления которых совпадают с выбранным положительным направлением эквивалентной ЭДС, записываются в формуле со знаком плюс, а имеющие противоположное направление, — со знаком минус.

Пример (рис. 4-14, б и г). Заменяются две ветви с ЭДС e_1 и e_2 :

$$\dot{E}_{\text{эк}} = \frac{\dot{E}_1 r - \dot{E}_2 j\omega L}{1/r + 1/j\omega L}; \quad Y_{\text{эк}} = \frac{1}{r} + \frac{1}{j\omega L}.$$

Метод наложения

Ток в каждой ветви рассчитывается как алгебраическая сумма токов, возникающих в этой ветви от действия каждого из источников ЭДС или тока в отдельности. Оставляя каждый раз один источник ЭДС или тока, необходимо сохранять все сопротивления (во всех ветвях):

$$\dot{I}_k = \underline{Y}_{k1} \dot{E}_1 + \underline{Y}_{k2} \dot{E}_2 + \dots + \underline{Y}_{kk} \dot{E}_k + \dots \\ \dots + \underline{Y}_{kn} \dot{E}_n + \underline{H}_{kp} \dot{J}_p + \dots + \underline{H}_{ks} \dot{J}_s,$$

где I_k — ток в k -й ветви; $E_1, E_2 \dots$ — ЭДС 1-й, 2-й... ветвей; Y_{km} — взаимная проводимость ветвей k и m ; Y_{kk} — выходная проводимость ветви k ; $J_p, \dots, J_s$ — токи источников в p -й, ..., s -й ветвях; $H_{kp}, \dots, H_{ks}$ — передаточные коэффициенты k -й и соответственно p -й, ..., s -й ветвей.

По определению $Y_{km} = I_k / \dot{E}_m$, когда все ЭДС, кроме $\dot{E}_m$, равны нулю и все ветви с источниками тока разомкнуты; $Y_{kk} = I_k / \dot{E}_k$, когда все ЭДС, кроме $\dot{E}_k$, равны нулю и все ветви с источниками тока разомкнуты; $H_{kp} = I_k / J_p$, когда все ЭДС равны нулю и разомкнуты все ветви с источниками тока, кроме ветви p .

Пример (рис. 4-14, б): $I_3 = Y_{31} \dot{E}_1 + Y_{32} \dot{E}_2$. Для определения, например, $Y_{31} = I_3 / \dot{E}_1$ оставляем в схеме только ЭДС $\dot{E}_1$ (рис. 4-14, в). Так как

$$I_1 = \frac{\dot{E}_1}{r + ix_L (-ix_C) / (ix_L - ix_C)};$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 \frac{ix_L}{i(x_L - x_C)}.$$

то

$$\frac{I_3}{\dot{E}_1} = Y_{31} = \frac{x_L}{r(x_L - x_C) - ix_L x_C}.$$

Схема линейна, поэтому при расчетах взаимных проводимостей можно положить $E_1 = 1$ В. Для вычисления взаимных проводимостей (и передаточных коэффициентов) применяют также метод подобия (см. ниже).

Преобразования схем соединения элементов треугольником и звездой

При замене соединения элементов треугольником соединением звездой сохраняются неизменными токи и напряжения для всех участков цепи, кроме преобразуемых элементов (рис. 4-15).

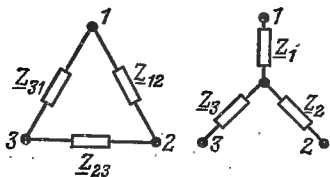


Рис. 4-15.

Формулы преобразования соединения элементов треугольником в соединение звездой:

$$Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}};$$

$$Z_2 = \frac{Z_{23} Z_{12}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}};$$

$$Z_3 = \frac{Z_{31} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}.$$

где $Z_{12} = Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}$.

Формулы преобразования соединения элементов звездой в соединение треугольником:

$$Y_{12} = \frac{Y_1 Y_2}{\Sigma Y}; \quad Y_{23} = \frac{Y_2 Y_3}{\Sigma Y};$$

$$Y_{31} = \frac{Y_3 Y_1}{\Sigma Y},$$

где $\Sigma Y = Y_1 + Y_2 + Y_3$; $Y_{12} = 1/Z_{12}$;

$Y_1 = 1/Z_1$ и т. д.

Метод подобия

Если цепь содержит один источник ЭДС или тока, то можно рассчитать все токи без составления системы уравнений. Предполагая ток $\dot{I}_0$ в одной из ветвей известным и равным, например, 1 А, определяем токи во всех ветвях и значение ЭДС или тока источника, действующего вместо заданного, чтобы получить ток 1 А. Пользуясь свойством линейности цепи, из пропорций находим токи, возникающие при действии заданной ЭДС или заданного источника тока.

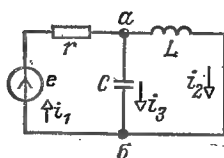


Рис. 4-16.

Пример (рис. 4-16). Пусть $\dot{I}_0 = 1$ А. Тогда

$$\dot{U}_{aб} = j\omega L \cdot 1; \quad \dot{I}_{30} = \dot{U}_{aб} j\omega C; \quad \dot{I}_{10} = \dot{I}_{30} +$$

$$+ \dot{I}_{20} = -\omega^2 LC + 1; \quad \dot{E}_0 = r \dot{I}_{10} +$$

$$+ \dot{U}_{aб} = -\omega^2 LC r + r + j\omega L;$$

$$\dot{E}_0 / \dot{E}_1 = p.$$

Действительные токи $\dot{I}_k = p \dot{I}_{k0}$, где $k=1, 2, 3$.

Этот метод можно успешно применять при вычислении взаимных проводимостей и передаточных коэффициентов.

Пример (рис. 4-14, б). Для определения $Y_{31} = Y_{13}$ оставляем в схеме только ЭДС $\dot{E}_1$ (рис. 4-14, в) и задаем ток $\dot{I}_3$. Тогда

$$\dot{U}_{aб} = -ix_C \dot{I}_3; \quad \dot{I}_2 = \dot{U}_{aб} / ix_L =$$

$$= -\dot{I}_3 x_C / x_L; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_3 + \dot{I}_2 = \dot{I}_3 (1 - x_C / x_L);$$

$$\dot{E}_1 = r \dot{I}_1 + \dot{U}_{aб} = r (1 - x_C / x_L) \dot{I}_3 - ix_C \dot{I}_3;$$

$$Y_{31} = \dot{I}_3 / \dot{E}_1 =$$

$$= \frac{x_L}{r(x_L - x_C) - ix_L x_C}.$$

Метод подобия требует иногда предварительного преобразования соединений элементов треугольником в соединения звездой или обратно.

Если цепь содержит несколько источников ЭДС и тока, то метод подобия надо сочетать с методом наложения.

Принцип компенсации

Любой участок с падением напряжения $\underline{Z}\dot{I}$ можно заменить источником ЭДС $\dot{E} = \underline{Z}\dot{I}$, положительное направление которой противоположно положительному направлению тока (рис. 4-14, а и е). Такая замена не изменяет распределения токов и потенциалов в цепи. Если сопротивление $\underline{Z}$ изменяется, то изменяются ток $\dot{I}$ и ЭДС $\dot{E}$.

Теорема вариаций

В электрической цепи изменение сопротивления в какой-либо ветви q на $\Delta\underline{Z}_q$ вызывает изменение тока $\dot{I}_p$ в ветви p на $\Delta\dot{I}_p$, причем

$$\Delta\dot{I}_p = \frac{\dot{I}_{q0} \underline{Y}_{pq} \Delta\underline{Z}_q}{1 + \underline{Y}_{qq} \Delta\underline{Z}_q},$$

где $\dot{I}_{q0}$ — ток в ветви q ; $\underline{Y}_{pq}$ — взаимная проводимость ветвей p и q ; $\underline{Y}_{qq}$ — входная проводимость ветви q . Значения всех величин измерены или вычислены при $\Delta\underline{Z}_q = 0$.

Теорема взаимности

Если в цепи действует только одна ЭДС $\dot{E}_a$ в ветви a и при этом в ветви b ток равен $\dot{I}_b$, то при переносе этой ЭДС в ветвь b в ветви a ток $\dot{I}_a$ будет равен току $\dot{I}_b$, который раньше был в ветви b .

Линейные соотношения

При изменении сопротивления, ЭДС или тока источника в одной единственной ветви цепи все токи и напряжения попарно связаны линейными зависимостями вида $y = a + bx$, где x и y — ток любой ветви или напряжение между любыми точками, a и b — постоянные. Линейная зависимость при изменении тех же величин в двух ветвях имеет вид: $z = a + bx + cy$, где z — также ток или напряжение.

Пример. При изменении индуктивного сопротивления в схеме рис. 4-14, б между токами $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_3$ сохраняется линейная зависимость $\dot{I}_1 = a + b\dot{I}_3$.

Для вычисления коэффициентов a и b необходимо найти токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_3$ при двух значениях x_L , например при $x_L = \infty$ и $x_L = 0$. При $x_L = \infty$ (рис. 4-14, в) $\dot{I}_1 = \dot{I}_3 = \dot{I}_x = \dot{E}_1 / (r - jx_C)$. При $x_L = 0$ (короткое замыкание между точками a и b на рис. 4-14, б) $\dot{I}_1 = (\dot{E}_1 + \dot{E}_2) / r$; $\dot{I}_3 = -\dot{E}_2 / (-jx_C)$.

Составляем два уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 / (r - jx_C) &= a + b \dot{E}_1 / (r - jx_C); \\ (\dot{E}_1 + \dot{E}_2) / r &= a + b \dot{E}_2 / jx_C, \end{aligned}$$

из которых определяются коэффициенты a и b .

Передающая функция

В цепи с одним источником энергии, в частности, предназначенной для передачи и преобразования сигналов (информации), отношение величины, которая принята выходной, к заданной (входной, известной) определяется передающей (схемной, системной) функцией H цепи. Например, в комплексной форме

$$\begin{aligned} \underline{H}_I &= \dot{I}_k / \dot{I}_m; \quad \underline{H}_U = \dot{U}_k / \dot{U}_m; \quad \underline{H}_Z = \dot{U}_k / \dot{I}_m; \\ \underline{H}_Y &= \dot{I}_k / \dot{U}_m, \end{aligned}$$

где индекс k относится к выходной величине, а индекс m — к входной. В частности, взаимные проводимости, передающие коэффициенты и т. п. можно рассматривать как передающие функции.

Пример. Для цепи рис. 4-16 передающая функция между током $\dot{I}_2$ и током источника $\dot{I}_1$

$$\dot{I}_2 = \underline{H}_I \dot{I}_1,$$

где

$$\underline{H}_I = \frac{1/j\omega C}{j\omega L + 1/j\omega C}.$$

При изменении частоты тока, ЭДС или напряжения источника

$$\underline{H} = H(j\omega) = H(\omega) e^{j\psi(\omega)},$$

где $H(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика; $\psi(\omega)$ — фазо-частотная характеристика; $H(j\omega)$ — амплитудно-фазовая характеристика (на комплексной плоскости — годограф). Если $H(j\omega)$ — безразмерная величина, то $\ln H(j\omega) = \ln H(\omega) + j\psi(\omega)$ — логарифмическая амплитудно-фазовая характеристика.

Об обозначении напряжений на схемах

Для уточнения записи законов Кирхгофа и обобщенного закона Ома всегда необходимо указывать на схемах положительные направления токов и ЭДС. Записывая напряжения, следует указывать индексами, какое напряжение записано:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b \quad \text{или} \quad \dot{U}_{ba} = \dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_a \quad (\text{рис. 4-17});$$

$$\dot{U}_{ab} = -\dot{U}_{ba} = \dot{E} + \underline{Z} \dot{I} \quad (\text{рис. 4-17, а});$$

$$\dot{U}_{ab} = -\dot{U}_{ba} = -\dot{E} + \underline{Z} \dot{I} \quad (\text{рис. 4-17, б}).$$

Стрелки для ЭДС ставятся иногда не внутри источника, а рядом с ним.

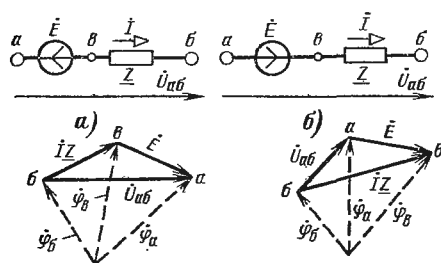


Рис. 4-17.

Сигнальные графы

Любую систему линейных уравнений, описывающую режим линейной электрической цепи, можно наглядно изобразить в виде сигнального графа, который состоит из

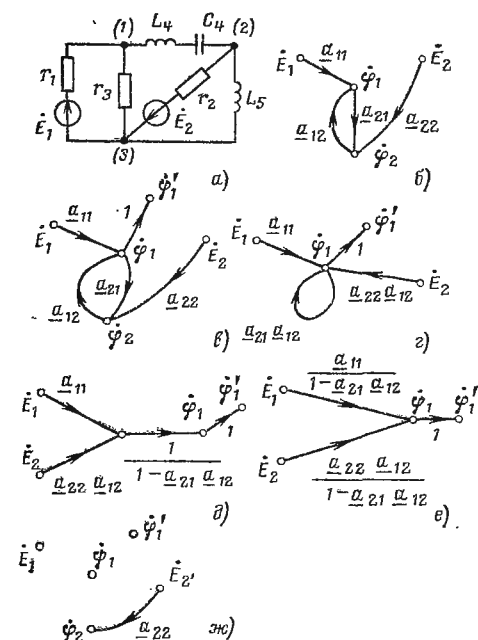


Рис. 4-18.

узлов и соединяющих узлы направленных ветвей. Узлы отображают зависимые переменные величины цепи (токи ветвей и напряжения на участках) и независимые (ЭДС и токи источников), ветви — коэффициенты при переменных в системе уравнений.

Для построения сигнального графа по системе уравнений каждая зависимая пе-

ременная представляется как функция всех других переменных (независимых и зависимых). Например, для схемы рис. 4-18, а по методу узловых потенциалов при $\dot{\varphi}_3 = 0$ получаются уравнения

$$\underline{Y}_{11} \dot{\varphi}_1 + \underline{Y}_{12} \dot{\varphi}_2 = \underline{Y}_{11} \dot{E}_1; \quad (1)$$

$$\underline{Y}_{21} \dot{\varphi}_1 + \underline{Y}_{22} \dot{\varphi}_2 = -\underline{Y}_{22} \dot{E}_2, \quad (2)$$

где

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{j(\omega L_4 - 1/\omega C_4)};$$

$$\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = -\frac{1}{j(\omega L_4 - 1/\omega C_4)};$$

$$\underline{Y}_{22} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{j(\omega L_4 - 1/\omega C_4)} + \frac{1}{j\omega L_5};$$

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{r_1}; \quad \underline{Y}_2 = \frac{1}{r_2}.$$

Из уравнения (1) определяется потенциал $\dot{\varphi}_1$ первого узла, а из уравнения (2) потенциал $\dot{\varphi}_2$ второго:

$$\dot{\varphi}_1 = a_{11} \dot{E}_1 + a_{12} \dot{\varphi}_2; \quad (3)$$

$$\dot{\varphi}_2 = a_{22} \dot{E}_2 + a_{21} \dot{\varphi}_1, \quad (4)$$

где

$$a_{11} = \underline{Y}_1 / \underline{Y}_{11}; \quad a_{12} = -\underline{Y}_{12} / \underline{Y}_{11};$$

$$a_{21} = -\underline{Y}_{21} / \underline{Y}_{22}; \quad a_{22} = -\underline{Y}_2 / \underline{Y}_{22};$$

здесь следует иметь в виду, что $a_{12} \neq a_{21}$.

Уравнения (1), (2) или (3), (4) содержат две зависимые ($\dot{\varphi}_1$, $\dot{\varphi}_2$) и две независимые ($\dot{E}_1$, $\dot{E}_2$) переменные. Поэтому граф имеет четыре узла (рис. 4-18, б). Ветвь соединяет соответствующие узлы, если коэффициент, который определяет передачу ветви, $a_{ik} \neq 0$, и направлена к узлу i .

В общем случае граф имеет узлы — истоки, к которым присоединены только выходящие ветви ($\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ на рис. 4-18, б), промежуточные узлы с входящими и выходящими ветвями ($\dot{\varphi}_1$ и $\dot{\varphi}_2$ на рис. 4-18, б) и узлы — стоки, к которым присоединены только входящие ветви. В сток можно преобразовать любой промежуточный узел, добавляя ветвь с единичной передачей. Например, у графа рис. 4-18, в, эквивалентного графу рис. 4-18, б, есть сток $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_1$.

Для определения искомой величины, например потенциала $\dot{\varphi}_1$, надо исключить из системы уравнений остальные зависимые переменные [из уравнений (1), (2) или (3), (4) потенциал $\dot{\varphi}_2$]. Исключению зависимой переменной соответствует основное преобразование графа — исключение промежуточного узла.

Правила исключения промежуточного узла в простейших графах показаны на рис. 4-19, а—в, где цифрами обозначены

узлы и указаны значения передач ветвей до и после исключения. С применением этих правил исключен узел ϕ_2 рис. 4-18, в и получен граф рис. 4-18, г.

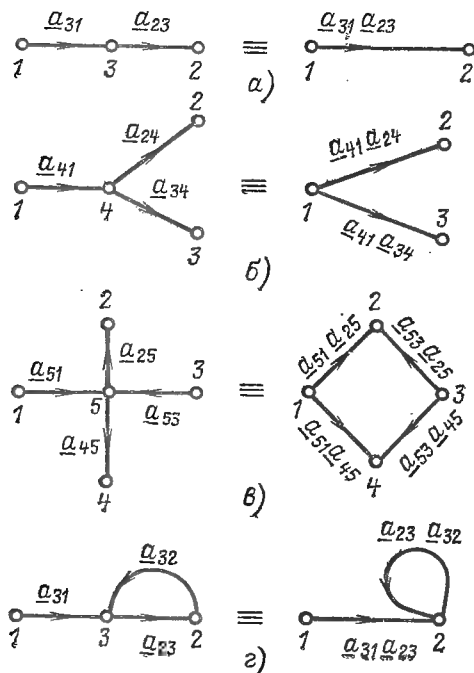


Рис. 4-19.

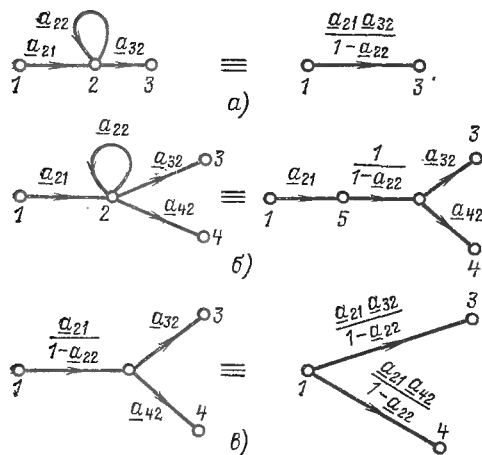


Рис. 4-20.

На рис. 4-18, г и 4-19, г после исключения промежуточного узла получилась, в частности, ветвь — петля, входящая в тот же узел, из которого она выходит. На рис. 4-20, а—в показаны правила устранения промежуточного узла с петлей. Во втором случае сначала образуется дополни-

тельный узел (5 на рис. 4-20, б), который затем исключается.

Путем применения этих правил получен граф рис. 4-18, д. После исключения дополнительного узла (рис. 4-18, е) можно сразу записать искомый потенциал:

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}'_1 = \frac{a_{11}}{1 - a_{21} a_{12}} \dot{E}_1 + \frac{a_{22} a_{12}}{1 - a_{21} a_{12}} \dot{E}_2.$$

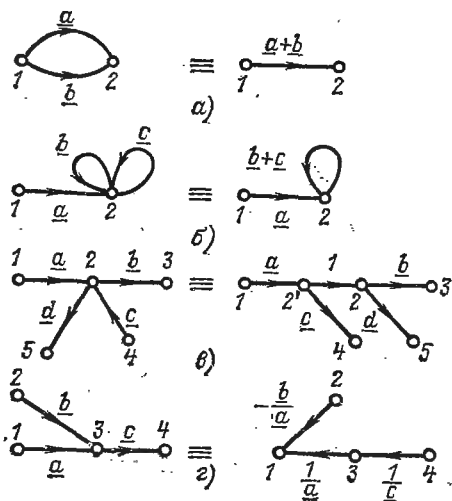


Рис. 4-21.

На рис. 4-21, а—г, показан еще ряд правил преобразования графа.

Для графа с одним истоком и одним стоком передача (передаточная функция) между ними может быть определена по топологической формуле (Мэсона). Применение этой формулы требует введения для графа следующих понятий: 1) путь (направленный) — непрерывная последовательность ветвей графа между какими-либо двумя узлами при условии, что начальный узел каждой ветви (кроме первой) совпадает с конечным узлом предыдущей ветви, причем каждый узел и ветвь в этой последовательности встречаются один раз; 2) прямой путь — путь, начинающийся в истоке и заканчивающийся в стоке; 3) передача прямого пути Π_k — произведение передач всех ветвей этого пути; 4) контур — замкнутый путь, т. е. начинающийся и заканчивающийся в одном и том же узле; 5) передача контура L_k — произведение передач ветвей этого контура (в частном случае контур может состоять из одной ветви — петли); 6) определитель графа Δ — определитель системы уравнений, отображаемых графом; 7) минор прямого пути Δ_k — определитель графа, получающегося после исключения всех ветвей k -го прямого

пути и ветвей, имеющих с этим путем общие узлы (определитель той части исходного графа, которая не соприкасается с k -м прямым путем).

Передача

$$\underline{H} = \frac{\sum_k \underline{P}_k \underline{\Delta}_k}{\underline{\Delta}}$$

где суммирование должно быть выполнено по всем прямым путям;

$$\underline{\Delta} = 1 - \sum_k \underline{P}_k^{(1)} + \sum_k \underline{P}_k^{(2)} - \sum_k \underline{P}_k^{(3)} + \dots;$$

$\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = \sum_k \underline{L}_k$ — сумма передач всех контуров графа; $\sum_k \underline{P}_k^{(i)} = \sum_k \underline{L}_{k1} \underline{L}_{k2} \dots \underline{L}_{ki}$ —

сумма произведений передач всех возможных комбинаций из i некасающихся контуров ($i=2,3,\dots$); миноры $\underline{\Delta}_k$ вычисляются по той же формуле, что и $\underline{\Delta}$.

Если граф имеет несколько истоков (независимых переменных), то для определения зависимой переменной нужно применить метод наложения.

Пример. Для графа рис. 4-18, в определить передачу $\underline{H}$ между истоком $\dot{E}_1$ и стоком $\dot{\Phi}_1'$.

Контур один (состоящий из ветвей с передачами $\underline{a}_{21}$ и $\underline{a}_{12}$), т. е. $k=1$. Следовательно,

$$\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = \underline{L}_1 = \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}; \quad \sum_k \underline{P}_k^{(i)} = 0$$

при $i>1$, так как контур один, и $\underline{\Delta} = 1 - \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}$. Передача прямого пути $\underline{P}_k = \underline{P}_1 = \underline{a}_{11} \cdot 1$. После исключения прямого пути между узлами $\dot{E}_1$ и $\dot{\Phi}_1'$, т. е. ветвей с передачами $\underline{a}_{21}$ и $\underline{a}_{12}$, имеющих с ним общий узел $\dot{\Phi}_1$, остается граф по рис. 4-18, ж, для которого $\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = 0$ и $\sum_k \underline{P}_k^{(i)} = 0$, т. е. $\underline{\Delta}_k = \underline{\Delta}_1 = 1$.

Передача

$$\underline{H}_1 = \frac{\dot{\Phi}_1'}{\dot{E}_1} = \frac{\underline{a}_{11} \cdot 1}{1 - \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}}.$$

Аналогично для передачи $\underline{H}_2$ между истоком $\dot{E}_2$ и стоком $\dot{\Phi}_1'$

$$\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = \underline{L}_1 = \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}; \quad \sum_k \underline{P}_k^{(i)} = 0;$$

$$\underline{\Delta} = 1 - \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}; \quad \underline{P}_1 = \underline{a}_{22} \underline{a}_{12} \cdot 1; \quad \underline{\Delta}_1 = 1,$$

т. е.

$$\underline{H}_2 = \frac{\dot{\Phi}_1'}{\dot{E}_2} = \frac{\underline{a}_{22} \underline{a}_{12}}{1 - \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}},$$

что совпадает с ранее полученным результатом.

Литература [4-1 — 4-21].

4-2. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Трехфазная система с нейтральным проводом

На рис. 4-22 обозначено: $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ — фазные напряжения генератора, которые, если можно пренебречь внутренними сопро-

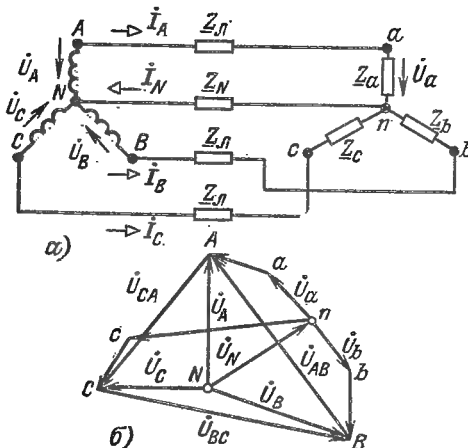


Рис. 4-22.

тивлениями генератора, равны фазным ЭДС $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$; $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ — фазные напряжения приемника; $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ — линейные напряжения генератора: $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$, $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$, $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$; $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ — линейные напряжения приемника; $\underline{Z}_l$ — эквивалентное сопротивление одного провода линии; $\underline{Z}_N$ — эквивалентное сопротивление нейтрального провода; $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ — фазные сопротивления приемника.

Напряжение между нейтральными точками генератора и приемника (смещение нейтрали), если принять $\dot{\Phi}_N = 0$,

$$\dot{U}_N = \dot{\Phi}_n - \dot{\Phi}_N = \dot{\Phi}_n = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N},$$

где $\underline{Y}_A = 1/(\underline{Z}_l + \underline{Z}_a)$; $\underline{Y}_B = 1/(\underline{Z}_l + \underline{Z}_b)$; $\underline{Y}_C = 1/(\underline{Z}_l + \underline{Z}_c)$; $\underline{Y}_N = 1/\underline{Z}_N$.

Линейные токи:

$$\dot{I}_A = (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \underline{Y}_A; \quad \dot{I}_B = (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \underline{Y}_B; \\ \dot{I}_C = (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \underline{Y}_C.$$

Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$. Фазные и линейные напряжения приемника:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_n = \underline{Z}_a \dot{I}_a; & \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b; \\ \dot{U}_b &= \dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_n = \underline{Z}_b \dot{I}_b; & \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_b - \dot{U}_c; \\ \dot{U}_c &= \dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_n = \underline{Z}_c \dot{I}_c; & \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_c - \dot{U}_a.\end{aligned}$$

При расчете цепей по этим формулам необходимо помнить, что трехфазная система с вращающимися электрическими машинами не всегда может быть представлена схемой по рис. 4-22, так как сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей могут иметь различные значения.

Трехфазная система без нейтрального провода

Пусть обмотки генератора соединены в звезду. Трехфазный приемник может быть соединен в треугольник или звезду.

Соединение звезда — звезда. Во все предыдущие формулы подставляется $\underline{Y}_N = 0$.

Если же заданы линейные напряжения, то

$$\dot{U}_{An} = \frac{\dot{U}_{AB} \underline{Y}_B - \dot{U}_{CA} \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C};$$

$$\dot{U}_{Bn} = \frac{\dot{U}_{BC} \underline{Y}_C - \dot{U}_{AB} \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C};$$

$$\dot{U}_{Cn} = \frac{\dot{U}_{CA} \underline{Y}_A - \dot{U}_{BC} \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C};$$

$$\dot{I}_A = \underline{Y}_A \dot{U}_{An}; \quad \dot{I}_B = \underline{Y}_B \dot{U}_{Bn};$$

$$\dot{I}_C = \underline{Y}_C \dot{U}_{Cn}.$$

Соединение звезда — треугольник (рис. 4-23, а). Трехфазный приемник, соединенный в треугольник, преобразуем в звезду по формулам § 4-1. Рассчитываются токи $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ и линейные напряжения приемника, как указано выше. Фазные токи:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}.$$

Обмотка генератора соединена треугольником.

Соединение треугольник — треугольник. Если симметричный генератор соединен треугольником, то в общем случае для расчета внешней цепи данный генератор можно заменить симметричным генератором, соединенным звездой, с $U_A = U_B = U_C = U_{AB}/\sqrt{3}$ и далее проводить расчет, как указано выше.

Если можно считать $\underline{Z}_n = 0$ (рис. 4-23, б), то проще сначала найти

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}},$$

а затем

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

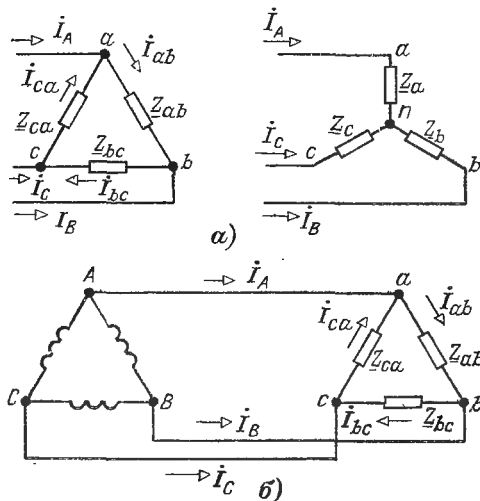


Рис. 4-23.

Симметричная трехфазная система

Фазные напряжения симметричного генератора, соединенного звездой (рис. 4-24):

$$u_A = U_m \sin \omega t; \quad u_B = U_m \sin (\omega t - 120^\circ);$$

$$u_C = U_m \sin (\omega t + 120^\circ),$$

или

$$\dot{U}_A = U_\phi; \quad \dot{U}_B = U_\phi \angle -120^\circ;$$

$$\dot{U}_C = U_\phi \angle +120^\circ.$$

Линейные напряжения

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi \text{ и } \dot{U}_{AB} = U_L \angle +30^\circ;$$

$$\dot{U}_{BC} = U_L \angle -90^\circ; \quad \dot{U}_{CA} = U_L \angle +150^\circ.$$

При симметричном приемнике, соединенном звездой, $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}$; смещение нейтрали $\dot{U}_N = 0$.

Линейные токи

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C = U_\phi / |\underline{Z}_L + \underline{Z}| = \dot{I}_L$$

и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° , ток $\dot{I}_N = 0$ и при наличии нейтрального провода. Фазные и линейные напряжения приемника соответственно одинаковы по значению:

$$U_a = U_b = U_c; \quad U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = \sqrt{3} U_a.$$

При симметричном приемнике, соединенном треугольником, $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}$ и линейные токи одинаковы по значению

$$I_A = I_B = I_C = U_{\Phi} / \left| \underline{Z}_{\text{л}} + \frac{\underline{Z}}{3} \right| = I_{\text{л}}$$

и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° .

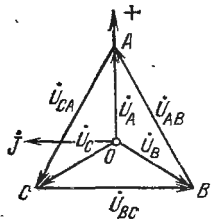


Рис. 4-24.

Аналогично фазные токи приемника

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\text{л}} / \sqrt{3}$$

и фазные напряжения приемника

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = |\underline{Z}| I_{\text{л}} / \sqrt{3}.$$

Для обоих случаев активная мощность генератора

$$P_{\text{Г}} = 3U_A I_A \cos \varphi_{\text{Г}} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{Г}};$$

реактивная мощность генератора

$$Q_{\text{Г}} = 3U_A I_A \sin \varphi_{\text{Г}} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{Г}},$$

где $\varphi_{\text{Г}}$ — угол сдвига фаз между фазным напряжением генератора и током в той же фазе генератора, который равен току в линии при соединении обмоток генератора звездой;

активная мощность приемника

$$P_{\text{П}} = 3U_a I_A \cos \varphi_{\text{П}} = \sqrt{3} U_{ab} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{П}};$$

реактивная мощность приемника

$$Q_{\text{П}} = 3U_a I_A \sin \varphi_{\text{П}} = \sqrt{3} U_{ab} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{П}},$$

где $\varphi_{\text{П}}$ — угол сдвига фаз между фазным напряжением приемника и током в той же фазе приемника, который равен $I_{\text{л}}$ только при соединении звездой;

полная мощность генератора

$$S_{\text{Г}} = 3U_A I_A = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}};$$

полная мощность приемника

$$S_{\text{П}} = 3U_a I_A = \sqrt{3} U_{ab} I_{\text{л}}.$$

Метод симметричных составляющих

Метод симметричных составляющих состоит в приведении несимметричных трехфазных систем к симметричным. Метод основан на разложении каждого из трех заданных (или искомым) векторов (например, $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$) на сумму трех векторов: ну-

левой ($\dot{U}_0$), прямой ($\dot{U}_1$) и обратной ($\dot{U}_2$) последовательностей (рис. 4-25):

$$\dot{U}_A = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 a^2 + \dot{U}_2 a; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 a + \dot{U}_2 a^2,$$

откуда

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C);$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C);$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C),$$

где $a = 1e^{j120^\circ} = 1\angle +120^\circ$ — фазовый множитель; $a^2 = 1e^{-j120^\circ} = 1\angle -120^\circ$.

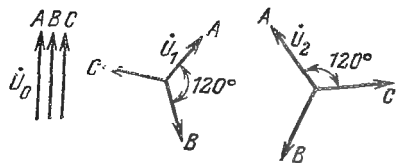


Рис. 4-25.

Составляющие нулевой, прямой и обратной последовательностей могут быть найдены геометрическим построением в соответствии с приведенными аналитическими выражениями. После разложения несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие применяют метод наложения, т. е. рассчитывают цепь отдельно для нулевой, прямой и обратной последовательностей. При этом сопротивления для нулевой, прямой и обратной последовательностей могут быть различными. Данный метод позволяет суммировать не только токи и напряжения, но и активные мощности

$$P = 3U_0 I_0 \cos \varphi_0 + 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 + 3U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

и реактивные мощности:

$$Q = 3U_0 I_0 \sin \varphi_0 + 3U_1 I_1 \sin \varphi_1 + 3U_2 I_2 \sin \varphi_2.$$

Метод симметричных составляющих может быть применен и для двухфазных систем.

Литература [4-1—4-6, 4-22, 4-23].

4-3. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ

Разложение периодических функций в тригонометрический ряд

Несинусоидальные периодические ЭДС, напряжения, токи и т. д. (рис. 4-26) раскладываются в тригонометрический ряд (Эйлера — Фурье), который может быть записан в любой из трех форм:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(k\omega_1 t + \psi_k);$$

$$f(t) = d_0 + \sum_{k=1}^{\infty} d_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k);$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_1 t + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin k\omega_1 t,$$

где $\omega_1 = 2\pi/T$ — частота (угловая) основной или первой гармоники; $k\omega_1$ — частоты высших гармоник; c_k , d_k , a_k , b_k — амплитуды

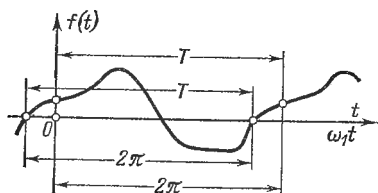


Рис. 4-26.

гармоник; $d_0 = a_0 = c_0$ — постоянные составляющие, причем

$$a_k = d_k \cos \varphi_k = c_k \sin \psi_k;$$

$$b_k = -d_k \sin \varphi_k = c_k \cos \psi_k;$$

$$d_k = c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_k = -b_k/a_k; \quad \operatorname{tg} \psi_k = a_k/b_k;$$

$$\psi_k = \varphi_k + \pi/2.$$

Коэффициенты ряда определяются по формулам

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d\omega_1 t;$$

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega_1 t dt = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos k\omega_1 t d\omega_1 t; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega_1 t dt = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin k\omega_1 t d\omega_1 t. \end{aligned}$$

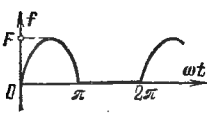
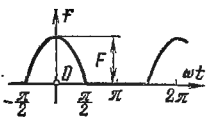
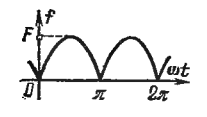
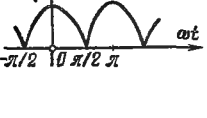
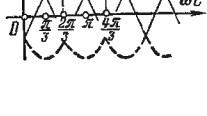
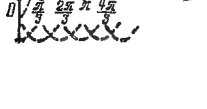
Для четной функции $f(t) = f(-t)$ (симметрия относительно оси ординат)

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) d\omega_1 t;$$

Т а б л и ц а 4-2
Разложение периодических функций
в тригонометрический ряд

График	Разложение в ряд
	$\begin{aligned} &\frac{4F}{\pi\alpha} (\sin \alpha \sin \omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3\omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin 5\omega_1 t + \dots) \end{aligned}$
	$\begin{aligned} &\frac{8F}{\pi^2} \left(\sin \omega_1 t - \right. \\ &- \frac{1}{9} \sin 3\omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{25} \sin 5\omega_1 t - \dots \left. \right) \end{aligned}$
	$\begin{aligned} &F_0 + \frac{4F}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \right. \\ &+ \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \dots \left. \right) \end{aligned}$
	$\begin{aligned} &mF + \frac{2F}{\pi} \left(\sin m\pi \times \right. \\ &\times \cos \omega_1 t + \\ &\frac{1}{2} \sin 2m\pi \times \cos 2\omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{3} \sin 3m\pi \times \\ &\times \cos 3\omega_1 t + \dots \left. \right) \end{aligned}$
	$\begin{aligned} &\frac{F}{2} + \frac{2F}{\pi} \left(\cos \omega_1 t - \right. \\ &- \frac{1}{3} \cos 3\omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{5} \cos 5\omega_1 t - \dots \left. \right) \end{aligned}$
	$\begin{aligned} &\frac{F}{2} - \frac{F}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \right. \\ &+ \frac{1}{2} \sin 2\omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \dots \left. \right) \end{aligned}$

Продолжение табл. 4-2

График	Разложение в ряд
	$\frac{2F}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \sin \omega_1 t - \frac{1}{1.3} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega_1 t - \dots \right)$
	$\frac{2F}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega_1 t + \frac{1}{1.3} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega_1 t + \frac{1}{5.7} \cos 6\omega_1 t - \dots \right)$
	$\frac{4F}{\pi} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1.3} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega_1 t - \dots \right)$
	$\frac{4F}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1.3} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega_1 t + \frac{1}{5.7} \cos 6\omega_1 t - \dots \right)$
	$\frac{3\sqrt{3}F}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2.4} \cos 3\omega_1 t - \frac{1}{5.7} \cos 6\omega_1 t + \frac{1}{8.10} \cos 9\omega_1 t - \dots \right)$
	$\frac{6F}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{5.7} \cos 6\omega_1 t - \frac{1}{11.13} \cos 12\omega_1 t + \frac{1}{17.19} \cos 18\omega_1 t - \dots \right)$

$$a_k = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos k\omega_1 t dt =$$

$$= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \cos k\omega_1 t d\omega_1 t;$$

$$b_k = 0.$$

Для нечетной функции $f(t) = -f(-t)$ (симметрия относительно начала координат)

$$a_0 = 0; \quad a_k = 0; \quad b_k = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \times$$

$$\times \sin k\omega_1 t dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \sin k\omega_1 t d\omega_1 t.$$

Если необходимо, начало отсчета времени ($t=0$) можно переносить так, чтобы функция стала четной или нечетной.

Для функции $f(t) = -f(t+T/2)$ ряд содержит только нечетные гармоники: $a_0 = a_{2k} = b_{2k} = c_{2k} = d_{2k} = 0$.

Если еще $f(t) = f(T/2 - t)$, то $a_k = 0$.

В табл. 4-2 приведены разложения наиболее часто встречающихся периодических функций.

В комплексной форме ряд

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{D}_k e^{jk\omega_1 t},$$

$$\text{где } \dot{D}_k = D_k e^{j\varphi_k} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jk\omega_1 t} dt =$$

$$= \frac{1}{2} (a_k - jb_k); \quad D_k = \frac{1}{2} \sqrt{a_k^2 + b_k^2} =$$

$$= \frac{d_k}{2}; \quad \dot{D}_{-k} = \frac{1}{2} (a_k + jb_k) = \dot{D}_k^*;$$

$$D_0 = a_0 = d_0.$$

Совокупность амплитуд гармоник (c_0 и c_k , d_0 и d_k , D_0 и D_k) составляет дискретный (линейчатый) спектр амплитуд, а совокупность начальных фаз (ψ_k или φ_k) — спектр фаз.

Ряд Эйлера — Фурье дает спектральный состав периодической несинусоидальной функции (напряжения, тока и т. д.).

Действующие и средние значения несинусоидальных периодических величин

Действующее значение F несинусоидальной периодической величины $f(t)$ (напряжения, тока, ЭДС и т. д.)

$$F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} =$$

$$= \sqrt{F_0^2 + F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + \dots},$$

где F_0 — постоянная составляющая; F_1 — действующее значение первой гармоники; $F_2, F_3, \dots$ — действующие значения высших гармоник, причем $F_k = F_{km} / \sqrt{2} (k=1, 2, 3 \dots)$ и F_{km} — амплитуда гармоники.

Среднее значение за период равно постоянной составляющей $F_0 = a_0 = c_0 = d_0$.

Среднее по модулю значение, измеряемое прибором выпрямительной системы,

$$F_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt.$$

Среднее максимальное за половину периода

$$F_{\text{ср, max}} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T/2} f(t) dt.$$

Так как среднее значение зависит от выбранного t_1 , то t_1 должно выбираться так, чтобы интеграл был максимальным.

Коэффициенты несинусоидальности

Степень несинусоидальности оценивается коэффициентами амплитуды k_a , формы k_Φ , искажений $k_{\text{иск}}$ и гармоник k_r :

$$k_a = \frac{f_{\text{max}}}{F}; \quad k_\Phi = \frac{F}{F_{\text{ср}}};$$

$$k_{\text{иск}} = \frac{F_1}{F}; \quad k_r = \frac{F_s}{F_1},$$

где f_{max} — максимальное (пиковое) значение; $F_s = \sqrt{F^2 - F_0^2 - F_1^2}$. Для синусоидальных величин $k_a = \sqrt{2}$; $k_\Phi = 1,11$; $k_{\text{иск}} = 1$; $k_r = 0$.

Мощность

Активная мощность

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T ui dt = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k,$$

где φ_k — сдвиг по фазе между напряжением и током k -й гармоники.

Полная мощность

$$S = UI = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots} \times$$

$$\times \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}$$

Реактивная мощность

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k \neq \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Коэффициент мощности

$$\lambda = P/S.$$

Если напряжение синусоидально, т. е. $u = U_{1m} \sin \omega_1 t$, как, например, напряжение достаточно мощной сети в выпрямительных установках, то

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = S_1 \cos \varphi_1; \quad S = U_1 I;$$

$$\lambda = (S_1/S) \cos \varphi_1 = k_{\text{иск}} \cos \varphi_1.$$

Эквивалентные синусоиды

При несинусоидальных напряжениях и токах, если несинусоидальность не имеет принципиального значения, их можно заменить эквивалентными синусоидальными напряжением и током. При замене действующее значение синусоидальной величины должно быть равно действующему значению несинусоидальной величины. Угол сдвига фаз θ между эквивалентным напряжением и током выбирается так, чтобы активная мощность осталась прежней:

$$P = UI \cos \theta = S \cos \theta.$$

Эквивалентная реактивная мощность

$$Q_{\text{эк}} = UI \sin \theta = \sqrt{S^2 - P^2} \neq Q.$$

Высшие гармоники в трехфазных цепях

Фазные напряжения могут кроме основной гармоники содержать еще нечетные высшие:

$$u_A = U_{1m} \sin \omega_1 t + U_{3m} \sin (3\omega_1 t + \psi_3) +$$

$$+ U_{5m} \sin (5\omega_1 t + \psi_5) + U_{7m} \sin (7\omega_1 t + \psi_7) + \dots;$$

$$u_B = U_{1m} \sin (\omega_1 t - 120^\circ) +$$

$$+ U_{3m} \sin (3\omega_1 t + \psi_3) + U_{5m} \sin (5\omega_1 t + 120^\circ + \psi_5) + \dots;$$

$$u_C = U_{1m} \sin (\omega_1 t + 120^\circ) + U_{3m} \sin (3\omega_1 t + \psi_3) + U_{5m} \sin (5\omega_1 t - 120^\circ + \psi_5) + \dots$$

Все высшие гармоники, кратные трем (3-я, 9-я и т. д.), имеют во всех фазах симметричной трехфазной системы в любой момент тождественные значения как составляющие нулевой последовательности. Первая (7-, 13-, 19-я и т. д.) гармоники во всех фазах сдвинута так же, как составляющие прямой последовательности. Пятая (11-я, 17-я и т. д.) гармоника имеет обратную последовательность.

Действующее значение фазного напряжения генератора, соединенного звездой,

$$U_\Phi = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots}$$

Линейное напряжение

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_{11}^2 + \dots} <$$

$$< \sqrt{3} U_\Phi.$$

При симметричной нагрузке в системе без нейтрального провода в линейных токах отсутствуют гармоники, кратные трем. При симметричной нагрузке в системе с нейтральным проводом линейные токи содержат все нечетные гармоники, а ток в нейтральном проводе

$$I_N = 3 \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}$$

При соединении обмоток генератора треугольником для гармоник, кратным трем, образуется короткозамкнутый контур и в линейных напряжениях, как и при соединении звездой, гармоники, кратные трем, отсутствуют.

Взаимная связь магнитного потока, ЭДС индукции, напряжения и тока в катушке со стальным магнитопроводом

Напряжение между конечными выводами катушки (рис. 4-27)

$$u = w \frac{d\Phi}{dt} + ri + L_{\text{рас}} \frac{di}{dt},$$

где Φ — основной магнитный поток, замыкающийся по магнитопроводу; w — число

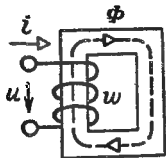


Рис. 4-27.

витков обмотки катушки; r — сопротивление обмотки; $L_{\text{рас}} = \Psi_{\text{рас}}/i$ — индуктивность рассеяния, зависящая от потекосцепления рассеяния $\Psi_{\text{рас}}$ или магнитного потока, замыкающегося вне магнитопровода.

Наводимая магнитным потоком Φ в обмотке ЭДС $e = -w d\Phi/dt$. Среднее значение ЭДС

$$E_{\text{ср}} = 2fw (\Phi_{\text{max}} - \Phi_{\text{min}}).$$

Если $\Phi_{\text{max}} = -\Phi_{\text{min}} = \Phi_m$, то $E_{\text{ср}} = 4fw\Phi_m$.

Действующее значение ЭДС $E = k_f E_{\text{ср}}$, где k_f — коэффициент формы. Для синусоидальной ЭДС $k_f = 1,11$ и $E = 4,44 fw\Phi_m$.

Для несинусоидальных ЭДС и магнитного потока последняя формула справедлива для каждой из гармоник в отдельности.

Зависимость между магнитным потоком Φ и током i в обмотке катушки, т. е. $\Phi(i)$, если не учитывать гистерезиса и вихревых токов, задается кривой намагничивания материала магнитопровода $B(H)$, причем

$$\Phi = BS \text{ и } iw = Hl_{\text{ср}},$$

где B — магнитная индукция; H — напряженность магнитного поля; iw — магнитодвижущая сила (МДС); S — площадь поперечного сечения магнитопровода катушки;

$l_{\text{ср}}$ — средняя длина линий магнитного потока.

При синусоидальном напряжении, приложенном к катушке,

$$u = U_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

магнитный поток изменяется также синусоидально (если пренебречь сопротивлением обмотки и потоком рассеяния):

$$\Phi = \frac{1}{w} \int u dt = \Phi_m \sin \omega t;$$

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44fw}.$$

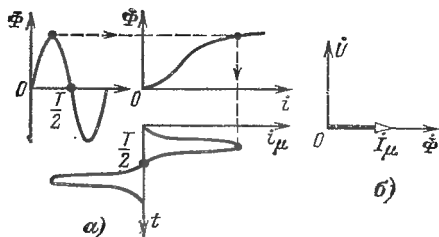


Рис. 4-28.

Кривая тока, который называется током намагничивания, несинусоидальна и может быть построена графически (рис. 4-28, а):

$$i_{\mu} = I_{1m} \sin \omega t - I_{3m} \sin 3\omega t + I_{5m} \sin 5\omega t - \dots$$

Заменив ток i_{μ} эквивалентной синусоидой, можно построить векторную диаграмму (рис. 4-28, б). Так как потерь нет, то вектор эквивалентной синусоиды тока i_{μ} отстает по фазе относительно напряжения на 90° .

Если катушка питается от источника синусоидального тока i , то поток и напряжение на катушке несинусоидальны. Кривая потока может быть построена по кривой намагничивания аналогично построению тока на рис. 4-28, а. Напряжение $u = w d\Phi/dt$. Векторная диаграмма (рис. 4-28, б) справедлива для эквивалентных синусоид напряжения и магнитного потока. Схема замещения катушки без потерь состоит из одного нелинейного индуктивного элемента.

Схема замещения катушки со стальным магнитопроводом при учете потерь

На схеме замещения (рис. 4-29, а) нелинейная проводимость g учитывает потери в стали. На рис. 4-29, б показана векторная диаграмма для эквивалентных синусоид. Из-за потерь ток $\dot{I}$ отстает от напряжения $\dot{U}$ на угол, меньший 90° , и расклады-

вается на активную составляющую I_a и реактивную I_p .

Если заданы U , r , $L_{рас}$, то можно считать $\Phi_m \approx U/4,44 f\omega$; $B_m = \Phi_m/S$. При $B_m = 0,5 \div 1,6$ Тл удельная мощность, затрачиваемая на перемагничивание стали (потери на гистерезис и вихревые токи),

$$p_c = p_{1,0} (B_m)^n (f/50)^{1,3},$$

где $n = 5,69 \lg(p_{1,5}/p_{1,0})$; $p_{1,0}$ и $p_{1,5}$ — удельные потери соответственно при $B_m = 1$ Тл и $B_m = 1,5$ Тл для $f = 50$ Гц (ГОСТ 2142.7.0-75).

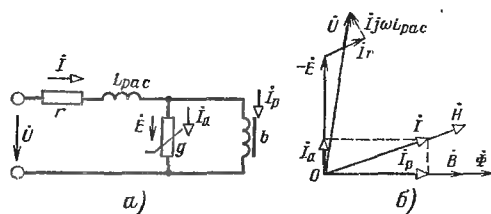


Рис 4-29.

Нередко для материала магнитопровода при данной частоте и толщине пластин задаются или определяются экспериментально кривые удельных (на единицу массы G) потерь $P_0(B_m)$ и реактивной мощности $Q_0(B_m)$. Тогда потери в стали и реактивная мощность

$$p_c = P_0 G \approx UI_a = U^2 g; \quad Q = Q_0 G \approx UI_p = U^2 b,$$

откуда можно найти g и b при данном U , а также I_a , I_p и $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$.

Литература [4-1—4-7, 4-24—4-31].

4.4. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Переходные процессы в линейных цепях с сосредоточенными параметрами

Законы Кирхгофа, записанные для мгновенных значений ЭДС, напряжений и токов, справедливы и для переходных режимов (дифференциальные уравнения).

Классический метод

При решении задачи классическим методом составляют необходимое число дифференциальных уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для схемы, получающейся после коммутации. Из полученной системы уравнений исключают все неизвестные токи, кроме искомого тока (или искомого напряжения). В результате получается уравнение вида

$$a_n \frac{d^n i}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} i}{dt^{n-1}} + \dots$$

$$\dots + a_1 \frac{di}{dt} + a_0 i = F(t),$$

где a_k — постоянные коэффициенты; $F(t)$ — известная функция времени.

Решением этого неоднородного дифференциального уравнения является функция $i=i(t)$, состоящая из двух частей: частного решения неоднородного уравнения и общего решения соответствующего однородного уравнения (в правой части нуль).

Если в цепи действуют источники гармонических или постоянных ЭДС или токов, то в качестве частного решения можно взять решение для установившегося режима (принужденного режима) в той же цепи после коммутации $i_y = i_y(t)$.

Установившийся режим рассчитывается методами, изложенными в § 4-1.

Общее решение однородного уравнения — свободный ток $i_{св} = i_{св}(t)$ имеет вид:

$$i_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_n e^{p_n t},$$

где $A_1, A_2, \dots, A_n$ — постоянные интегрирования; $p_1, p_2, \dots, p_n$ — корни характеристического уравнения:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0.$$

Если среди корней есть кратные, например $p_1 = p_2$, то

$$i_{св} = (A_1 + A_2 t) e^{p_1 t} + A_3 e^{p_3 t} + \dots + A_n e^{p_n t}.$$

Если среди корней есть пара комплексных сопряженных, например $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega$, то в общем решении удобнее соответствующую пару экспонент заменить функцией

$$Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \alpha),$$

где A и α — постоянные интегрирования, заменившие постоянные A_1 и A_2 .

Искомая функция, т. е. действительный ток переходного процесса,

$$i = i_y + i_{св} = i_{пр} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_n e^{p_n t}.$$

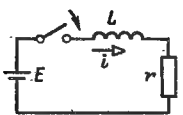
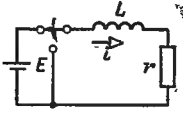
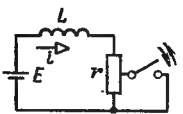
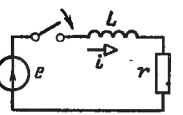
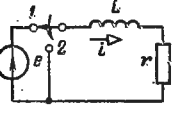
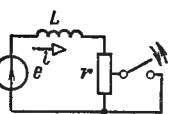
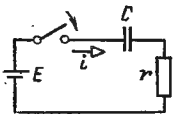
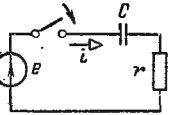
Постоянные $A_1, A_2, \dots, A_n$ определяют из начальных условий и законов коммутации: 1) ток в индуктивном элементе i_L не может изменяться скачком; 2) напряжение на емкостном элементе u_C не может изменяться скачком.

Из расчета цепи до коммутации могут быть найдены токи в катушках индуктивности и напряжения на конденсаторах в любой момент времени. В частности, в момент коммутации, который считается моментом $t=0$, находим $i_L(0)$ и $u_C(0)$.

Примечание. В «некорректных» задачах могут быть заданы такие коммутации, что в некоторых индуктивных элементах токи принудительно изменяются скачком, а на некоторых емкостных элементах напряжения принудительно изменяются скачком. В этом случае законы коммутации должны применяться в более общей форме, требующей отсутствия скачкообразных изменений потокоцеплений и электрических зарядов.

Таблица 4-3

Переходные процессы в простейших цепях

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
	$i = \frac{E}{r} (1 - e^{pt}); \quad u_L = E e^{pt}$	$p = -\frac{r}{L}$
	$i = -\frac{E}{r} e^{pt}; \quad u_L = -E e^{pt}$	$p = -\frac{r}{L}$
	$i = \frac{E}{r_2} + E \frac{r_2 - r_1}{r_2 r_1} e^{pt};$ $u_L = E \frac{r_1 - r_2}{r_1} e^{pt}$	$p = -\frac{r_2}{L}$
	$i = \frac{E_m}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{E_m}{z} \sin(\psi - \varphi) e^{pt};$ $u_L = \omega L \frac{E_m}{z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) +$ $+ r \frac{E_m}{z} \sin(\psi - \varphi) e^{pt}$	$p = -\frac{r}{L}$
	$i = \frac{E_m}{z} \sin(\psi - \varphi) e^{pt};$ $u_L = -r \frac{E_m}{z} \sin(\psi - \varphi) e^{pt}$	$p = -\frac{r}{L}$
	$i = \frac{E_m}{z_2} \sin(\omega t + \psi - \varphi_2) + E_m \left[\frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{z_1} - \right.$ $\left. - \frac{\sin(\psi - \varphi_2)}{z_2} \right] e^{pt};$ $u_L = \omega L \frac{E_m}{z_2} \cos(\omega t + \psi - \varphi_2) -$ $- r_2 E_m \left[\frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{z_1} - \frac{\sin(\psi - \varphi_2)}{z_2} \right] e^{pt}$	$p = -\frac{r_2}{L}$
	$i = \frac{E}{r} e^{pt}; \quad u_C = E (1 - e^{pt})$	$p = -\frac{1}{rC}$
	$i = \frac{E_m}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) -$ $- \frac{E_m}{z} \frac{1}{r\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{pt};$ $u_C = -\frac{E_m}{z} \frac{1}{\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi) +$ $+ \frac{E_m}{z} \frac{1}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{pt}$	$p = -\frac{1}{rC}$

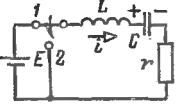
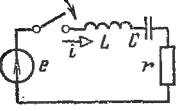
Продолжение табл. 4-3

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
	$i = -\frac{E}{r} e^{pt}; \quad u_C = E e^{pt}$	$p = -\frac{1}{rC}$
	$i = \frac{E_m}{z} \frac{1}{r\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{pt};$ $u_C = -\frac{E_m}{z} \frac{1}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{pt}$	$p = -\frac{1}{rC}$
	$i = \frac{E_m}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi_2) -$ $- \frac{E_m}{r_2 \omega C} \left[\frac{\cos(\psi - \varphi_2)}{z_2} - \frac{\cos(\psi - \varphi_1)}{z_1} \right] e^{pt};$ $u_C = -\frac{E_m}{z_2} \frac{1}{\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi_2) +$ $+ \frac{E_m}{\omega C} \left[\frac{\cos(\psi - \varphi_2)}{z_2} - \frac{\cos(\psi - \varphi_1)}{z_1} \right] e^{pt}$	$p = -\frac{1}{r_2 C}$
	$i = \frac{E}{r_1} \left(1 - \frac{r_2}{r_1 + r_2} e^{pt} \right);$ $i_L = \frac{E}{r_1} (1 - e^{pt})$	$p = -\frac{r}{L};$ $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{E}{r_1 + r_3} + \left(\frac{ER/r_3}{r_1 + R} - \frac{E}{r_1 + r_3} \right) e^{pt};$ $u_L = (r_1 + r_3) \left(\frac{E}{r_1 + r_3} - \frac{ER/r_3}{r_1 + R} \right) e^{pt};$ $R = r_2 r_3 / (r_2 + r_3)$	$p = -\frac{r_1 + r_3}{L}$
	$i = \frac{E}{r_1 + R} \left(1 - \frac{r_2 - R}{r_1 + r_2} e^{pt} \right);$ $i_L = \frac{ER/r_3}{r_1 + R} (1 - e^{pt}); \quad R = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}$	$p = -\frac{r}{L};$ $r = r_3 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{E}{r_1 + r_2} \left(1 + \frac{r_2}{r_1} \right) e^{pt};$ $u_C = E \frac{r_2}{r_1 + r_2} (1 - e^{pt})$	$p = -\frac{1}{rC};$ $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{E}{r_1 + R} + \left[\frac{E(r_1 + r_2 + r_3)}{(r_1 + r_2)(r_1 + r_3)} - \frac{E}{r_1 + R} \right] e^{pt};$ $i_L = \frac{ER/r_3}{r_1 + R} + \left(\frac{E}{r_1 + r_3} - \frac{ER/r_3}{r_1 + R} \right) e^{pt};$ $R = r_2 r_3 / (r_2 + r_3)$	$p = -\frac{r}{L};$ $r = r_3 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$

Продолжение табл. 4-3

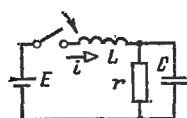
Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
	$i = \frac{E}{r_1 + r_2} \left(1 + \frac{r_2 - R}{r_1 + R} e^{pt} \right);$ $u_C = \frac{Er_2}{r_1 + r_2} (1 - e^{pt}); \quad R = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}$	$p = -\frac{1}{rC};$ $r = r_3 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{Er_1}{(r_1 + r_2)(r_1 + r_3)} e^{pt};$ $u_C = E - \frac{Er_1}{r_1 + r_2} e^{pt};$	$p = -\frac{1}{(r_1 + r_3)C}$
	$i = \frac{E}{r_1 + r_2} + \left(\frac{Er_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} - \frac{E}{r_1 + r_2} \right) e^{pt};$ $u_C = \frac{E}{r_1 + r_2} (r_2 + r_1 e^{pt})$	$p = -\frac{1}{rC};$ $r = r_3 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{U_0}{r} e^{pt}; \quad u_{C2} = \frac{U_0 C_1}{C_1 + C_2} (1 - e^{pt})$	$p = -1/rC;$ $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$
$\delta = \frac{r}{2L}$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$i = \frac{E}{L(\alpha_1 - \alpha_2)} (e^{-\alpha_2 t} - e^{-\alpha_1 t});$ $u_C = E + \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_2 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{-\alpha_2 t});$	$p_1 = -\alpha_1;$ $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа) $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$
	$i = \frac{E}{\omega' L} e^{-\delta t} \sin \omega' t; \quad \omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2};$ $u_C = E - E \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta t} \cos(\omega' t - \gamma); \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{\delta}{\omega'}$	$p_1 = -\delta + j\omega';$ $p_2 = -\delta - j\omega'$
	$i = \frac{E}{L} t e^{-\delta t}; \quad \delta = \omega_0;$ $u_C = E - E(1 + \delta t) e^{-\delta t}$	$p_1 = p_2 = -\delta$
$\delta = \frac{1}{2rC}$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$i = \frac{E}{r} \left(1 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{-\alpha_1 t} - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{-\alpha_2 t} \right);$ $u_C = L \frac{E}{r} \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} (-e^{-\alpha_1 t} + e^{-\alpha_2 t});$ $i = \frac{E}{r} \left(1 - 2 \frac{\delta}{\omega'} e^{-\delta t} \sin \omega' t \right);$ $u_C = \frac{\omega_0}{r} E \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta t} \sin \omega' t;$	$p_1 = -\alpha_1;$ $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа) $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ $p_1 = -\delta + j\omega';$ $p_2 = -\delta - j\omega'$ $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$

Продолжение табл. 4-3

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
 $\delta = r/2L$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$i = \frac{E}{L(\alpha_1 - \alpha_2)} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t});$ $u_C = \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_1 e^{-\alpha_2 t} - \alpha_2 e^{-\alpha_1 t});$ $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$	$p_1 = -\alpha_1;$ $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа)
	$i = -\frac{E}{L} t e^{-\delta t}; \quad \delta = \omega_0;$ $u_C = E(1 + \delta t) e^{-\delta t}$	$p_1 = p_2 = -\delta$
	$i = -\frac{E}{\omega' L} e^{-\delta t} \sin \omega' t; \quad \omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2};$ $u_C = E \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta t} \cos(\omega' t - \gamma); \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{\delta}{\omega'}$	$p_1 = -\delta + j\omega';$ $p_2 = -\delta - j\omega'$
 $\delta = r/2L$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ $\psi_i = \psi - \varphi$ $\psi_u = \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}$ $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$	$i = \frac{E_m}{\omega} \sin(\omega t + \psi_i) - \frac{E_m}{\omega(\alpha_1 - \alpha_2)} \times$ $\times [\alpha_1 (\omega \sin \psi_i - \alpha_2 \cos \psi_i) e^{-\alpha_1 t} - \alpha_2 (\omega \sin \psi_i - \alpha_1 \cos \psi_i) e^{-\alpha_2 t}];$ $u_C = \frac{E_m}{\omega C} \sin(\omega t + \psi_u) + \frac{E_m}{\omega C(\alpha_1 - \alpha_2)} \times$ $\times [(\alpha_2 \sin \psi_u + \omega \cos \psi_u) e^{-\alpha_1 t} - (\alpha_1 \sin \psi_u + \omega \cos \psi_u) e^{-\alpha_2 t}]$	$p_1 = -\alpha_1;$ $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа)
	$i = \frac{E_m}{\omega} \sin(\omega t + \psi_i) + \frac{E_m}{\omega} e^{-\delta t} \times$ $\times \left[\left(\frac{\omega_0^2}{\omega \omega'} \cos \psi_i + \frac{\delta}{\omega'} \sin \psi_i \right) \sin \omega' t - \sin \psi_i \cos \omega' t \right];$ $u_C = \frac{E_m}{\omega C} \sin(\omega t + \psi_u) - \frac{E_m}{\omega C} e^{-\delta t} \times$ $\times \left[\left(\frac{\delta}{\omega'} \sin \psi_u + \frac{\omega}{\omega'} \cos \psi_u \right) \sin \omega' t + \sin \psi_u \cos \omega' t \right]$	$p_1 = -\delta + j\omega';$ $p_2 = -\delta - j\omega'$

Продолжение табл. 4-3

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
--------------------	-------------------	-------------------------------------



$$\delta = \frac{1}{2rC}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$i = \frac{E}{r} \left(1 + \frac{r/L - \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} e^{-\alpha_1 t} - \frac{r/L - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} e^{-\alpha_2 t} \right);$$

$$u_C = E + \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_2 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{-\alpha_2 t});$$

$$\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

$$p_1 = -\alpha_1;$$

$$p_2 = -\alpha_2$$

(действительные числа)

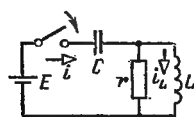
$$i = \frac{E}{r} \left[1 + \frac{r}{\omega' L} e^{-\delta t} \sin \omega' t - \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \eta) \right];$$

$$u_C = E - E \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \eta);$$

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}; \quad \operatorname{tg} \eta = \omega' / \delta$$

$$p_1 = -\delta + j\omega';$$

$$p_2 = -\delta - j\omega'$$



$$\delta = \frac{1}{2rC}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$i_L = \frac{E}{L(\alpha_2 - \alpha_1)} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t});$$

$$u_C = E - \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_1 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_2 e^{-\alpha_2 t})$$

$$\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

$$p_1 = -\alpha_1;$$

$$p_2 = -\alpha_2$$

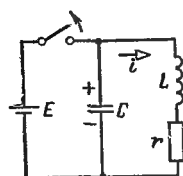
(действительные числа)

$$i_L = \frac{E}{\omega' L} e^{-\delta t} \sin \omega' t; \quad \omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2};$$

$$u_C = E + E \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta t} \sin(\omega' t - \eta); \quad \operatorname{tg} \eta = \omega' / \delta$$

$$p_1 = -\delta + j\omega';$$

$$p_2 = -\delta - j\omega'$$



$$\delta = \frac{r}{2L}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$i = \frac{E}{r} \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_1 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_2 e^{-\alpha_2 t}) - \frac{E}{L(\alpha_1 - \alpha_2)} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t});$$

$$\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2};$$

$$u_C = \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[\left(\frac{1}{rC} - \alpha_2 \right) e^{-\alpha_1 t} - \left(\frac{1}{rC} - \alpha_1 \right) e^{-\alpha_2 t} \right]$$

$$p_1 = -\alpha_1;$$

$$p_2 = -\alpha_2$$

(действительные числа)

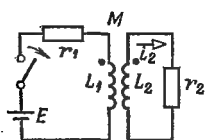
$$i = \frac{E}{r} \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \eta);$$

$$u_C = E \frac{\omega_0^2}{2\delta\omega'} e^{-\delta t} \sin(\omega' t + 2\eta);$$

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}; \quad \operatorname{tg} \eta = \omega' / \delta$$

$$p_1 = -\delta + j\omega';$$

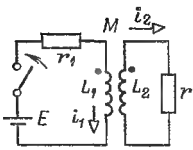
$$p_2 = -\delta - j\omega'$$



$$i_2 = -\frac{E}{r_1} \frac{M}{L_2} e^{pt}$$

$$p = -\frac{r_2}{L_2}$$

Продолжение табл. 4-3

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
 $\tau_1 = \frac{L_1}{r_1};$ $\tau_2 = \frac{L_2}{r_2};$ $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$	$i_1 = \frac{E}{r_1} \left(1 + p_2 \frac{1 + p_1 \tau_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - p_1 \frac{1 + p_2 \tau_2}{p_1 - p_2} \times \right. \\ \left. \times e^{p_2 t} \right);$ $i_2 = \frac{k^2 E}{(p_2 - p_1)(1 - k^2) M} (e^{p_2 t} - e^{p_1 t});$ $\beta = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \sqrt{(\tau_1 - \tau_2)^2 + 4k^2 \tau_1 \tau_2}$ При отсутствии рассеяния ($k=1$) $i_1 = \frac{E}{r_1} \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} e^{pt} \right);$ $i_2 = \frac{E \tau_1 \tau_2}{\sqrt{L_1 L_2} (\tau_1 + \tau_2)} e^{pt}$	$p_{1,2} = - \frac{\tau_1 + \tau_2}{2(1 - k^2) \tau_1 \tau_2} \pm \frac{\beta}{2(1 - k^2)}$ $p = - \frac{1}{\tau_1 + \tau_2}$
	В частности, при $L_1 = L_2 = L$, $r_1 = r_2 = r$ и $k \neq 1$ $i_1 = \frac{E}{2r} (2 - e^{p_1 t} - e^{p_2 t});$ $i_2 = \frac{E}{2r} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t})$ При отсутствии рассеяния ($k=1$) $i_1 = \frac{E}{r} \left(1 - \frac{1}{2} e^{pt} \right); \quad i_2 = \frac{E}{2r} e^{pt}$	$p_1 = - \frac{r}{L + M};$ $p_2 = - \frac{r}{L - M}$ $p = - \frac{r}{2L}$

Принятые условия и обозначения:

1. Переключение рубильника из положения 1 в положение 2 происходит мгновенно, когда режим в цепи перед переключением установился.

2. На схемах буквой e обозначены ЭДС, изменяющиеся по синусоидальному закону: $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$.3. Угол ψ определяет значение ЭДС e в момент коммутации $t=0$, т. е. $e(0) = E_m \sin \psi$.4. Изменение сопротивления r происходит скачком от значения r_1 до значения r_2 (рубильник мгновенно включается или отключается).5. $z = \sqrt{r^2 + x^2}$; $\text{tg } \varphi = x/r$, где $x = \omega L - 1/\omega C$ для схем с L и C ; $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x^2}$; $\text{tg } \varphi_1 = x/r_1$,где $x = \omega L$ для схем с L ; $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x^2}$; $\text{tg } \varphi_2 = x/r_2$, где $x = -1/\omega C$ для схем с C .

Подставляя найденные значения $i_L(0)$ и $u_C(0)$ в уравнения Кирхгофа, находим из них:

$$i(0); \quad di/dt|_{t=0}; \quad \dots; \quad d^{n-1}i/dt^{n-1}|_{t=0}.$$

Коэффициенты $A_1, A_2, \dots, A_n$ определяются из системы уравнений

$$i(0) = i_y(0) + A_1 + A_2 + \dots + A_n;$$

$$\frac{di}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{di_y}{dt} \Big|_{t=0} + A_1 p_1 + \dots + A_n p_n;$$

.....

$$\frac{d^{n-1}i}{dt^{n-1}} \Big|_{t=0} = \frac{d^{n-1}i_y}{dt^{n-1}} \Big|_{t=0} + A_1 p_1^{n-1} +$$

$$+ \dots + A_n p_n^{n-1},$$

где корни характеристического уравнения $p_1, p_2, \dots, p_n$ и начальные значения тока и его $n-1$ производных $i(0), di/dt|_{t=0} \dots$ уже

известны, а начальные значения принужденного тока и его производных легко определить, так как установившийся режим после коммутации уже рассчитан.

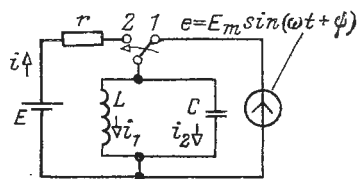


Рис. 4-30.

Результаты расчета для простейших цепей приведены в табл. 4-3.

Пример (рис. 4-30). В момент $t=0$ рубильник мгновенно переключается из положения 1 в положение 2. Дано: $E=10$ В; $r=10$ Ом; $C=100$ мкФ; $L=62,5$ мГн; $\omega L=20$ Ом; $E_m=10$ В; $\psi=30^\circ$. Найти ток i . Угол $\psi=30^\circ$ характеризует значение ЭДС в момент коммутации $e(0)=E_m \sin \psi=5$ В.

Уравнения Кирхгофа для схемы после коммутации:

$$-i + i_1 + i_2 = 0; \quad (1)$$

$$ri + L \frac{di_1}{dt} = E; \quad (2)$$

$$ri + u_C = ri + \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt + u_C(0) = E, \quad (3)$$

или после дифференцирования (3)

$$r \frac{di}{dt} + i_2/C = 0. \quad (4)$$

Из системы уравнений (1), (2), (4) дифференцированием (1) и (4) и подстановкой di/dt и di_1/dt из (2) и (4) в (1) исключаем токи i_1 и i_2 и получаем уравнение:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{rC} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = \frac{1}{LC} \frac{E}{r}$$

Частное решение этого уравнения, т. е. установившийся ток в схеме после коммутации, $i_{\text{уст}} = E/r = 1$ А.

Характеристическое уравнение

$$p^2 + p/rC + 1/LC = 0$$

имеет решение:

$$p_{1,2} = -1/2rC \pm \sqrt{1/4r^2C^2 - 1/LC};$$

$$p_1 = -200 \text{ с}^{-1}; \quad p_2 = -800 \text{ с}^{-1}.$$

Общее решение однородного уравнения, или свободный ток, имеет два слагаемых:

$$i_{\text{св}} = A_1 e^{-200t} + A_2 e^{-800t}.$$

Ток i переходного процесса

$$i = i_{\text{уст}} + i_{\text{св}} = 1 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (5)$$

Для определения постоянных интегрирования составим систему уравнений. Полагая в (5) $t=0$, получаем:

$$i(0) = 1 + A_1 + A_2. \quad (6)$$

Дифференцируя (5) и полагая $t=0$, получаем:

$$di/dt|_{t=0} = -200A_1 - 800A_2. \quad (7)$$

При помощи законов коммутации находим $i(0)$ и $di/dt|_{t=0}$. Для этого сначала определим i_1 и u_C в схеме до коммутации:

$$i_1 = \frac{E_m}{\omega L} \sin(\omega t + \psi - 90^\circ);$$

$$u_C = E_m \sin(\omega t + \psi).$$

Отсюда при $t=0$ (в момент коммутации)

$$i_1(0) = \frac{E_m}{\omega L} \sin(\psi - 90^\circ) = -0,44 \text{ А};$$

$$u_C(0) = E_m \sin \psi = 5 \text{ В}.$$

Подставляем найденные значения $i_1(0)$ и $u_C(0)$ в уравнения Кирхгофа для схемы после коммутации (1)–(3) для момента $t=0$:

$$-i(0) + i_1(0) + i_2(0) = 0 \text{ или}$$

$$i(0) = -0,44 + i_2(0); \quad (1')$$

$$ri(0) + L \frac{di_1}{dt}|_{t=0} = E; \quad (2')$$

$$ri(0) + u_C(0) = E \text{ или } 10i(0) + 5 = 10. \quad (3')$$

Из (3') находим $i(0) = 0,5$ А, а из (1') находим $i_2(0) = 0,94$ А; производную $di/dt|_{t=0}$ опре-

деляем из (4), полученного дифференцированием (3), подставляя $t=0$:

$$\frac{di}{dt}|_{t=0} = -\frac{i_2(0)}{rC} = -940 \text{ А/с}.$$

При найденных начальных значениях $i(0)$ и $di/dt|_{t=0}$ находим A_1 и A_2 , решая совместно (6) и (7): $A_1 = -2,23$ и $A_2 = 1,73$. Теперь в формуле (5) все неизвестные величины определены:

$$i = 1 - 2,23e^{-200t} + 1,73e^{-800t} \text{ А}.$$

Уравнения цепи можно составлять также при помощи метода контурных токов и других методов расчета цепей.

Характеристическое уравнение проще получить без совместного решения системы дифференциальных уравнений, если составить согласно методу контурных токов определитель из сопротивлений в комплексной форме для схемы после коммутации, заменить $j\omega$ на p и приравнять определитель нулю.

Пример (рис. 4-30):

$$\begin{vmatrix} r + pL & -pL \\ -pL & pL + 1/pC \end{vmatrix} = 0.$$

Это уравнение дает те же корни, что и найденные выше.

Корни характеристического уравнения одинаковы для любого тока или напряжения данной цепи (кроме схем, содержащих ветви с идеальными источниками ЭДС и без других элементов). Корни могут быть найдены из уравнения

$$Z(p) = 0,$$

где $Z(p) = Z(j\omega)$ при замене $j\omega$ на p , а $Z(j\omega)$ — комплексное сопротивление или вообще коэффициент пропорциональности между гармонической ЭДС (которую можно считать включенной в любую ветвь) и любым током (или напряжением) для схемы после коммутации.

Пример (рис. 4-30):

$$Z(p) = r + \frac{pL \cdot 1/pC}{pL + 1/pC} = 0,$$

если комплексное сопротивление $Z(j\omega)$ есть входное сопротивление при гармонической ЭДС, включенной в левую ветвь (вместо ЭДС E), или

$$Z(p) = pL + \frac{r \cdot 1/pC}{r + 1/pC} = 0,$$

или

$$Z(p) = \frac{1}{pC} + \frac{r \cdot pL}{r + pL} = 0.$$

Любое из полученных уравнений дает те же корни, что и найденные выше.

$Z(p)$ можно рассматривать как полное операторное сопротивление; pL — индуктивное операторное сопротивление; $1/pC$ — емкостное.

Метод переменных состояния

Метод переменных состояния основан на решении уравнений состояния — дифференциальных уравнений первого порядка.

получается:

$$\alpha_0 = \frac{\lambda_1 e^{\lambda_2 t} - \lambda_2 e^{\lambda_1 t}}{\lambda_1 - \lambda_2}; \quad \alpha_1 = \frac{e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

и

$$e^{At} = \alpha_0 \cdot 1 + \alpha_1 A = e^{\lambda_1 t} \frac{A - \lambda_2 1}{\lambda_1 - \lambda_2} - e^{\lambda_2 t} \frac{A - \lambda_1 1}{\lambda_1 - \lambda_2}.$$

Здесь

$$A - \lambda_2 1 = \begin{bmatrix} -\lambda_2 & 1/C \\ -1/L & -r/L - \lambda_2 \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} -\lambda_2 & 1/C \\ -1/L & \lambda_1 \end{bmatrix} = A_1; \\ A - \lambda_1 1 = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & 1/C \\ -1/L & \lambda_2 \end{bmatrix} = A_2.$$

Теперь

$$X = \left\| \begin{matrix} u_C \\ i_L \end{matrix} \right\| = \frac{A_1 e^{\lambda_1 t} - A_2 e^{\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2} \left\{ X(0) + \right. \\ \left. + \int_0^t (A_1 e^{\lambda_1 \theta} - A_2 e^{\lambda_2 \theta}) \left\| \begin{matrix} 0 \\ 1/L \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \begin{matrix} 0 \\ E \end{matrix} \right\| d\theta \right\}.$$

откуда, например, при $U_0 = 0$:

$$i_L = \frac{E}{L(\lambda_1 - \lambda_2)} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}).$$

Если в цепи действует один источник ЭДС $F(t) = I(t)$ и начальные условия нулевые, то

$$X(t) = (e^{At} - 1) A^{-1} B; \quad Y(t) = \\ = M(e^{At} - 1) A^{-1} B + N;$$

это переходные функции цепи.

Матричная экспоненциальная функция по определению представляется бесконечным рядом

$$e^{At} = 1 + At + A^2 \frac{t^2}{2!} + A^3 \frac{t^3}{3!} + \dots$$

При ограничении конечным числом слагаемых вычисление сводится к умножению и суммированию матриц, что выполняется при помощи стандартных программ на ЭВМ.

Уравнения состояния проще всего решаются методом численного интегрирования — методом Эйлера.

Операторный метод

Операторный метод решения линейных дифференциальных уравнений не требует определения постоянных интегрирования ($A_1, A_2, \dots, A_n$).

Если в дифференциальных уравнениях заменить все известные функции времени $f(t)$ (оригиналы) их операторными изображениями $F(p)$, найденными при помощи преобразования Лапласа (или Карсона), и все неизвестные токи i , производные di/dt и интегралы $\int i dt$ — их операторными изо-

бражениями $I(p)$, $pI(p) - i(0)$, $I(p)/p$, то из полученной системы алгебраических уравнений (уравнений Кирхгофа в операторной форме) можно найти изображение любого неизвестного тока (или напряжения).

В общем случае изображение функции может быть найдено при помощи преобразования Лапласа

$$F(p) = \int_0^\infty f(t) e^{-pt} dt$$

[или преобразования Карсона

$$\Phi(p) = p \int_0^\infty f(t) e^{-pt} dt].$$

Сокращению эти преобразования записываются в виде

$$F(p) \longleftrightarrow f(t) \text{ [или } \Phi(p) \overset{\cdot}{=} f(t), \text{ причем}$$

$$\Phi(p) = pF(p)].$$

Предполагается, что оригинал $f(t) = 0$ при $t < 0$, что он может иметь только конечное число точек разрыва первого рода на любом конечном интервале и при $t > 0$ возрастает не быстрее экспоненты:

$$|f(t)| < M e^{s_0 t},$$

где M, s_0 — постоянные.

Изображения наиболее часто встречающихся функций по Лапласу, а также производной от функции и интеграла приведены в табл. 4-4.

Далее все формулы даны для преобразования Лапласа.

По найденному изображению тока (или напряжения) сама функция может быть найдена при помощи табл. 4-4, формулы обращения (интеграл Бромвича) или вычетов:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{s-j\infty}^{s+j\infty} F(p) e^{pt} dp = \\ = \sum \operatorname{res} F(p) e^{pt} \text{ при } p=p_k.$$

Здесь путь интегрирования представляет собой вертикальную прямую $\operatorname{Re} p = s > s_0 > 0$, ориентированную вверх. Сумма вычетов (res) берется по всем особым точкам — корням характеристического уравнения p_k .

В простом полюсе ($p = p_k$ — не кратный корень)

$$\operatorname{res} F(p) e^{pt} = \lim_{p \rightarrow p_k} [(p - p_k) F(p) e^{pt}].$$

В полюсе порядка n ($p = p_k$ — кратный корень порядка n)

$$\operatorname{res} F(p) e^{pt} = \frac{1}{(n-1)!} \times$$

$$\times \lim_{p \rightarrow p_k} \frac{d^{n-1}}{dp^{n-1}} [(p - p_k)^n F(p) e^{pt}].$$

Т а б л и ц а 4-4

Оригиналы и изображения (по Лапласу)

Оригинал $f(t) = f$	Изображение $F(p) = F$
f	F
$d f / dt$	$pF - f(0)$
$\int_0^t f dt$	F/p
$I(t)$ — функция Хевисайда	$1/p$
$\delta(t)$ — функция Дирака	1
t	$1/p^2$
$t^n (n — \text{целое})$	$n! / p^{n+1}$
e^{-at}	$\frac{1}{p+a}$
$1 - e^{-at}$	$\frac{a}{p(p+a)}$
$(1-at)e^{-at}$	$\frac{p}{(p+a)^2}$
te^{-at}	$\frac{1}{(p+a)^2}$
$t^{n-1} e^{-at}$	$\frac{(n-1)!}{(p+a)^n}$
$(n — \text{целое})$	
$\frac{e^{-bt} - e^{-at}}{a-b}$	$\frac{1}{(p+a)(p+b)}$
$\frac{ae^{-at} - be^{-bt}}{a-b}$	$\frac{p}{(p+a)(p+b)}$
$1 + \frac{be^{-at} - ae^{-bt}}{a-b}$	$\frac{ab}{p(p+a)(p+b)}$
$1 - (1+at)e^{-at}$	$\frac{a^2}{p(p+a)^2}$
$\cos \omega_0 t$	$\frac{p}{p^2 + \omega_0^2}$
$\sin \omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2}$
$\cos(\omega_0 t + \varphi)$	$\frac{p \cos \varphi - \omega_0 \sin \varphi}{p^2 + \omega_0^2}$
$\sin(\omega_0 t + \varphi)$	$\frac{p \sin \varphi + \omega_0 \cos \varphi}{p^2 + \omega_0^2}$
$t \cos \omega_0 t$	$\frac{p^2 - \omega_0^2}{(p^2 + \omega_0^2)^2}$
$t \sin \omega_0 t$	$\frac{2\omega_0 p}{(p^2 + \omega_0^2)^2}$

Продолжение табл. 4-4

Оригинал $f(t) = f$	Изображение $F(p) = F$
$e^{-at} \cos \omega_0 t$	$\frac{p+a}{(p+a)^2 + \omega_0^2}$
$e^{-at} \sin \omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{(p+a)^2 + \omega_0^2}$
$\frac{\cos at - \cos bt}{b^2 - a^2}$	$\frac{p}{(p^2 + a^2)(p^2 + b^2)}$
$\text{sh } \omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{p^2 - \omega_0^2}$
$\text{ch } \omega_0 t$	$\frac{p}{p^2 - \omega_0^2}$
$e^{-at} \text{sh } \omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{(p+a)^2 - \omega_0^2}$
$e^{-at} \text{ch } \omega_0 t$	$\frac{p+a}{(p+a)^2 - \omega_0^2}$

Для рациональных дробей может быть применена теорема разложения. Если

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \quad \text{или} \quad F(p) = \frac{F_1(p)}{pF_3(p)},$$

то соответственно

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t};$$

$$f(t) = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)} e^{p_k t},$$

где $F_1(p)$, $F_2(p)$, $F_3(p)$ — полиномы относительно p ; p_k — корни уравнения $F_2(p) = 0$ или $F_3(p) = 0$; n — число корней; $F'(p) = dF(p)/dp$.

Формулы теоремы разложения предполагают отсутствие нулевых или кратных корней в уравнениях $F_2(p) = 0$ и $F_3(p) = 0$. При двух кратных корнях надо применить те же формулы, считая один из кратных корней равным $p_k + \alpha$ (α — малая величина), и затем принять $\alpha \rightarrow 0$.

Аналогично можно определить $f(t)$ при любом числе кратных корней.

Пример (рис. 4-30). Уравнения (1)–(3) из примера расчета классическим методом в операторной форме:

$$-I(p) + I_1(p) + I_2(p) = 0; \quad (8)$$

$$rI(p) + pLI_1(p) - Li_1(0) = E/p; \quad (9)$$

$$rI(p) + I_2(p)/pC + \nu_C(0)/p = E/p. \quad (10)$$

где E/p —изображение заданной постоянной ЭДС; $i_1(0)$ и $u_C(0)$, как и раньше, определяются из режима до коммутации.

Из уравнений (8)—(10)

$$I(p) = \frac{[E - u_C(0)] p^2 LC + p L i_1(0) + E}{p(p^2 L C r + p L + r)} = \frac{3,13 \cdot 10^{-5} p^2 - 2,75 \cdot 10^{-2} p + 10}{p(62,5 \cdot 10^{-6} p^2 + 62,5 \cdot 10^{-3} p + 10)} = \frac{F_1(p)}{p F_3(p)}.$$

Из уравнения $F_3(p)=0$ находим $p_1=-200$, $p_2=-800$. Затем $F_1(0)=10$; $F_3(0)=10$; $F_1(p_1)=16,75$; $F_1(p_2)=32,0$; $F_3'(p)=125 \cdot 10^{-6} p + 62,5 \cdot 10^{-3}$; $F_3'(p_1)=-375 \cdot 10^{-4}$; $F_3'(p_2)=-375 \cdot 10^{-4}$ и по теореме разложения получаем тот же ответ, что и раньше. При помощи вычетов в трех простых полюсах $p_1=-200$; $p_2=-800$ и $p_3=0$ находим три слагаемые суммы

$$i = \Sigma \operatorname{res} I(p) e^{pt}$$

и получаем тот же ответ, что и ранее.

Формулы Хевисайда

Формулы Хевисайда непосредственно пригодны для расчета переходного процесса в пассивной цепи, т. е. цепи, не содержащей до коммутации источников ЭДС (напряжения) и тока и запасов энергии (заряженных конденсаторов и индуктивных катушек с током).

При подключении к источнику ЭДС (источнику тока) вида $E_0 e^{\alpha t}$ искомый ток (или напряжение на любом элементе цепи) может быть найден по формуле

$$i = \frac{E_0 e^{\alpha t}}{K(\alpha)} + E_0 \sum_{k=1}^n \frac{e^{p_k t}}{(p_k - \alpha) K'(p_k)},$$

где $K(p)$ —операторное сопротивление или коэффициент пропорциональности между приложенным напряжением (током) источника и искомой величиной, т. е. величина, обратная передаточной функции в операторной форме $H(p)$; $K(\alpha)$ есть $K(p)$ при $p=\alpha$; p_k —корни уравнения $K(p)=0$; $K'(p)=dK(p)/dp$; n —число корней.

При включении источника постоянной ЭДС (постоянного тока) E_0

$$i = \frac{E_0}{K(0)} + E_0 \sum_{k=1}^n \frac{e^{p_k t}}{p_k K'(p_k)},$$

где $K(0)=K(p)$ при $p=0$.

При включении источника синусоидальной ЭДС (синусоидального тока) $E_m \sin(\omega t + \psi)$

$$i = \operatorname{Im} \left[\frac{\dot{E}_m}{K(j\omega)} + \dot{E}_m \sum_{k=1}^n \frac{e^{p_k t}}{(p_k - j\omega) K'(p_k)} \right].$$

При подключении к источнику ЭДС (к источнику тока) вида Bt

$$i = \frac{B(t)}{K(0)} - \sum_{k=1}^n \frac{B(1 - e^{p_k t})}{p_k^2 K'(p_k)}.$$

Пример (рис. 4-32). Найти напряжение u_r на резистивном элементе с сопротивлением r , если $E_0=10$ В; $r=10$ Ом; $L=1$ Гн:

$$U_r(p) = r I(p) = r \frac{E_0}{r + pL} = \frac{E_0}{K(p)},$$

откуда

$$K(p) = \frac{pL + r}{r}; \quad K(0) = 1; \quad K'(p) = \frac{L}{r}.$$

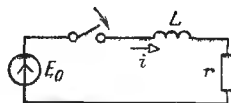


Рис. 4-32.

Характеристическое уравнение $K(p)=0$ дает один корень $p_1=-r/L=-10 \text{ с}^{-1}$, а $K'(p_1)=0,1$.

Искомое напряжение

$$u_r = 10 - 10 e^{-10t} \text{ В.}$$

Интеграл Дюамеля

При подключении источника ЭДС (тока) с напряжением (током) произвольной формы (рис. 4-33) к пассивной цепи для $0 < t < t_1$

$$a = u_1(0) h(t) + \int_0^t u_1'(\theta) h(t - \theta) d\theta;$$

для $t_1 < t < t_2$

$$a = u_1(0) h(t) + \int_0^{t_1} u_1'(\theta) h(t - \theta) d\theta + \Delta u_1 h(t - t_1) + \int_{t_1}^t u_2'(\theta) h(t - \theta) d\theta;$$

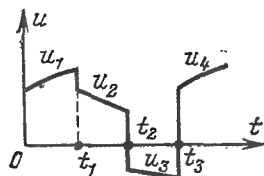


Рис. 4-33.

аналогично для $t_2 < t < t_3$ и т. д.; в частности, при $t_1 \rightarrow \infty$ первое выражение справедливо для любого t .

Здесь

$$\Delta u_1 = u_2(t_1) - u_1(t_1); \quad u'(\theta) = \frac{du}{dt} \Big|_{t=\theta_1}^{\theta_2}$$

a — искомый ток или искомое напряжение; $h(t)$ — переходная или передаточная функция — функция времени, численно равная искомому току (или напряжению), который получается при включении цепи не на заданное напряжение $u(t)$ (или ток источника), а на единичное напряжение 1 В (или ток 1 А); $h(t-\theta)$ и $h(t-t_1)$ — функция $h(t)$ при замене t соответственно на $t-\theta$ и $t-t_1$.

В частном случае, когда определяется ток, а подключается источник напряжения, функция $h(t)$ имеет размерность проводимости (переходная проводимость).

Интеграл Дюамеля может быть записан и в других эквивалентных формах.

Пример. К цепи по рис. 4-32 подключается источник ЭДС с напряжением по рис. 4-33, где $u_1 = 5 + 5t$; $t_1 = 0, 1$ с; $u_2 = 5e^{-2(t-0,1)}$; $t_2 \rightarrow \infty$. Найти напряжение u_p .

Переходная функция, т. е. напряжение u_p при $U_0 = 1$ В (см. предыдущий пример), $h = 1 - e^{-10t}$.

При $0 < t < t_1$

$$u_p = 5(1 - e^{-10t}) + \int_0^t 5[1 - e^{-10(t-\theta)}] d\theta = \\ = 4,5(1 - e^{-10t}) + 5t.$$

Аналогично проводится расчет при $t_1 < t < \infty$.

Интеграл Фурье

Для непериодических функций $f(t)$, имеющих конечное число точек разрыва I рода на любом конечном интервале и удовлетворяющих условию абсолютной интегрируемости, справедлива интегральная формула Фурье

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left[\int_{-\infty}^\infty f(\theta) \cos \omega(t-\theta) d\theta \right] d\omega;$$

она дает разложение функции $f(t)$ в непрерывный спектр:

$$f(t) = \int_0^\infty A(\omega) \cos \omega t d\omega + \\ + \int_0^\infty B(\omega) \sin \omega t d\omega,$$

где

$$A(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^\infty f(t) \cos \omega t dt; \\ B(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^\infty f(t) \sin \omega t dt;$$

$A(\omega)d\omega$ и $B(\omega)d\omega$ — бесконечно малые амплитуды косинусоидальных и синусоидальных составляющих спектра.

В комплексной форме

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

(обратное преобразование Фурье). Здесь $F(j\omega)$ — прямое преобразование Фурье:

$$F(j\omega) = F(\omega) e^{j\psi(\omega)} = \int_{-\infty}^\infty f(t) e^{-j\omega t} dt = \\ = \pi [A(\omega) - jB(\omega)]$$

— спектральная плотность; $F(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика функции $f(t)$; $\psi(\omega)$ — фазо-частотная характеристика.

Интеграл Фурье можно применить к расчету переходных процессов в линейных электрических цепях.

Если к пассивной цепи подключается в момент $t=0$, например, источник ЭДС $e(t)$, удовлетворяющий поставленным выше условиям, то спектральную плотность ЭДС можно найти по формуле прямого преобразования, выбрав нижний предел интегрирования равным нулю, или по формуле

$$E(j\omega) = E(p) |_{p=j\omega},$$

где $E(p)$ — операторное изображение ЭДС по Лапласу.

Спектральная плотность тока в любой из ветвей (или напряжения)

$$I(j\omega) = H(j\omega) E(j\omega),$$

где $H(j\omega)$ — передаточная функция в комплексной форме; в частности, при вычислении тока $H(j\omega) = Y(j\omega)$ — комплексная проводимость, так что $I(j\omega)$ находится известными методами (см. § 4-1).

Ток переходного процесса $i(t)$ определяется по формуле обратного преобразования или заменой $j\omega$ на p записывается изображение $I(p)$, а затем вычисляется ток $i(t)$ так же, как и в операторном методе.

Передаточная функция $H(j\omega)$ связана с переходной функцией $h(t)$ выражениями

$$H(j\omega) = h(0) + \int_0^\infty h'(\theta) e^{-j\omega\theta} d\theta$$

и

$$h(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^\infty \frac{H(j\omega)}{\omega} e^{j\omega t} d\omega.$$

При $H(j\omega) = Y(j\omega) = g(\omega) - jb(\omega)$

$$g(\omega) = \omega \int_0^\infty h(\theta) \sin \omega\theta d\theta = \\ = h(0) + \int_0^\infty h'(\theta) \cos \omega\theta d\theta;$$

$$b(\omega) = -\omega \int_0^{\infty} h(\theta) \cos \omega \theta d\theta = \\ = \int_0^{\infty} h'(\theta) \sin \omega \theta d\theta;$$

$$h(t) = g(0) - \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{b(\omega)}{\omega} \cos \omega t d\omega = \\ = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{g(\omega)}{\omega} \sin \omega t d\omega.$$

Включение ветвей

Расчет переходного процесса при подключении какой-либо ветви к электрической цепи, которая рассматривается как актив-

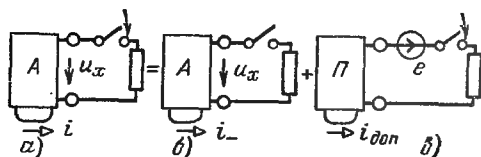


Рис. 4-34.

ный двухполюсник, можно свести к включению источника ЭДС в пассивную цепь (рис. 4-34).

Ток i (напряжение) в любой ветви электрической цепи (показанной на рис. 4-34, а) и, в частности, в той, которая подключается, после замыкания рубильника можно рассчитать как сумму тока i_- в этой ветви до замыкания рубильника (рис. 4-34, б) и тока $i_{доп}$, получающегося в этой ветви при подключении к пассивной цепи при помощи рубильника источника ЭДС e , равной напряжению на рубильнике u_x до его замыкания (рис. 4-34, в). Для расчета цепи, представленной на рис. 4-34, в, т. е. тока $i_{доп}$, может применяться любой метод расчета переходного процесса, в частности формулы Хевисайда и интегралы Дюамеля и Фурье.

Отключение ветвей

Расчет переходного процесса при отключении какой-либо ветви электрической цепи, которая рассматривается как активный двухполюсник, можно свести к включению источника тока в пассивную цепь (рис. 4-35).

Ток i (напряжение) в любой ветви, не содержащей индуктивного элемента и представленной на рис. 4-35, а, после размыкания рубильника можно найти как сумму тока i_- в ветви до размыкания рубильника (рис. 4-35, б) и тока $i_{доп}$, получающегося в

этой ветви при включении вместо отключаемой ветви источника тока J (рис. 4-35, в). Источник тока включается в пассивную цепь. Ток J источника равен току i_- , который протекал в отключаемой ветви до замыкания рубильника.

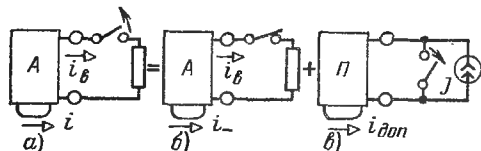


Рис. 4-35.

Для расчета цепи, представленной на рис. 4-35, в, может применяться любой метод расчета переходных процессов и, в частности, формулы Хевисайда и интегралы Дюамеля и Фурье.

Литература [4-1—4-7, 4-32—4-39].

4-5. ПАСИВНЫЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ, ФИЛЬТРЫ И ЛИНИИ

Несимметричные четырехполюсники

Пассивные (не содержащие источников энергии) взаимные четырехполюсники (рис. 4-36, а), в частности фильтры и линии, характеризуются тремя или четырьмя пара-

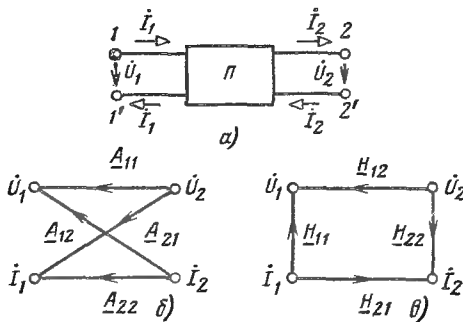


Рис. 4-36.

метрами. Если для характеристики четырехполюсника пользуются четырьмя параметрами, то только три из них независимы.

Основные уравнения четырехполюсника связывают режим на первичных выводах 1—1' с режимом на вторичных 2—2'.

Уравнения, связывающие напряжения и токи $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_2$, записываются в различной форме в зависимости от выбранных параметров, например:

$$1. \quad \dot{U}_1 = \underline{A}_{11} \dot{U}_2 + \underline{A}_{12} \dot{I}_2; \quad \dot{I}_1 = \underline{A}_{21} \dot{U}_2 + \\ + \underline{A}_{22} \dot{I}_2;$$

$$2. \dot{I}_1 = \underline{Y}_{11} \dot{U}_1 + \underline{Y}_{12} \dot{U}_2;$$

$$\dot{I}_2 = \underline{Y}_{21} \dot{U}_1 + \underline{Y}_{22} \dot{U}_2;$$

$$3. \dot{U}_1 = \underline{Z}_{11} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{12} \dot{I}_2;$$

$$\dot{U}_2 = \underline{Z}_{21} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{22} \dot{I}_2;$$

$$4. \dot{U}_1 = \underline{H}_{11} \dot{I}_1 + \underline{H}_{12} \dot{I}_2;$$

$$\dot{I}_2 = \underline{H}_{21} \dot{I}_1 + \underline{H}_{22} \dot{I}_2.$$

Размерность коэффициентов в различных типах уравнений ясна из формул. Из четырех коэффициентов каждого типа уравнений только три независимых, так как

$$\underline{A}_{11} \underline{A}_{22} - \underline{A}_{12} \underline{A}_{21} = 1; \quad \underline{Y}_{12} = -\underline{Y}_{21};$$

$$\underline{Z}_{12} = -\underline{Z}_{21}; \quad \underline{H}_{12} = \underline{H}_{21}.$$

Связь между коэффициентами различных типов уравнений представлена в табл. 4-5.

Уравнения четырехполюсника могут быть записаны и в матричной форме, например:

$$\| \dot{I} \| = \| \underline{Y} \| \cdot \| \dot{U} \|,$$

где

$$\| \dot{I} \| = \begin{Bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{Bmatrix}; \quad \| \dot{U} \| = \begin{Bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{Bmatrix};$$

$$\| \underline{Y} \| = \begin{Bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{Bmatrix}.$$

Для каждой системы уравнений четырехполюсника можно составить сигнальный граф. Например, для 1-й и 4-й систем уравнений графы показаны на рис. 4-36, б и в.

На рис. 4-36, б — истоки $\dot{U}_2$ и $\dot{I}_2$, стоки $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$; на рис. 4-36, в — истоки $\dot{I}_1$ и $\dot{U}_2$, стоки $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_2$.

При решении вопросов передачи информации чаще всего выбирают уравнения четырехполюсника с вторичными (характеристическими) параметрами:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \left(\sqrt{\underline{Z}_{c1}/\underline{Z}_{c2}} \operatorname{ch} \underline{\Gamma} \right) \dot{U}_2 + \\ &+ \left(\sqrt{\underline{Z}_{c1} \underline{Z}_{c2}} \operatorname{sh} \underline{\Gamma} \right) \dot{I}_2; \end{aligned}$$

Т а б л и ц а 4-5

Связь коэффициентов четырехполюсников

Тип уравнений	Коэффициенты			
	$\underline{A}$	$\underline{Y}$	$\underline{Z}$	$\underline{H}$
$\underline{A}$	$\begin{matrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} -\frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} & \frac{1}{\underline{Y}_{21}} \\ -\frac{\Delta \underline{Y}}{\underline{Y}_{21}} & \frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}} - \frac{\Delta \underline{Z}}{\underline{Z}_{21}} \\ \frac{1}{\underline{Z}_{21}} - \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} -\frac{\Delta \underline{H}}{\underline{H}_{21}} & \frac{\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{21}} \\ -\frac{\underline{H}_{22}}{\underline{H}_{21}} & \frac{1}{\underline{H}_{21}} \end{matrix}$
$\underline{Y}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{12}} & -\frac{1}{\underline{A}_{12}} \\ \frac{1}{\underline{A}_{12}} & -\frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{12}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{Z}_{22}}{\Delta \underline{Z}} - \frac{\underline{Z}_{12}}{\Delta \underline{Z}} \\ -\frac{\underline{Z}_{21}}{\Delta \underline{Z}} & \frac{\underline{Z}_{11}}{\Delta \underline{Z}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{\underline{H}_{11}} & -\frac{\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{11}} \\ \frac{\underline{H}_{21}}{\underline{H}_{11}} & \frac{\Delta \underline{H}}{\underline{H}_{11}} \end{matrix}$
$\underline{Z}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{21}} & -\frac{1}{\underline{A}_{21}} \\ \frac{1}{\underline{A}_{21}} & -\frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{Y}_{22}}{\Delta \underline{Y}} & -\frac{\underline{Y}_{12}}{\Delta \underline{Y}} \\ -\frac{\underline{Y}_{21}}{\Delta \underline{Y}} & \frac{\underline{Y}_{11}}{\Delta \underline{Y}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\Delta \underline{H}}{\underline{H}_{22}} & \frac{\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{22}} \\ -\frac{\underline{H}_{21}}{\underline{H}_{22}} & \frac{1}{\underline{H}_{22}} \end{matrix}$
$\underline{H}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22}} & \frac{1}{\underline{A}_{22}} \\ \frac{1}{\underline{A}_{22}} & -\frac{\underline{A}_{21}}{\underline{A}_{22}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{\underline{Y}_{11}} & -\frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{11}} \\ \frac{\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{11}} & \frac{\Delta \underline{Y}}{\underline{Y}_{11}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\Delta \underline{Z}}{\underline{Z}_{22}} & \frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{22}} \\ -\frac{\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{22}} & \frac{1}{\underline{Z}_{22}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22} \end{matrix}$

$$\Delta \underline{Y} = \underline{Y}_{11} \underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12} \underline{Y}_{21}; \quad \Delta \underline{Z} = \underline{Z}_{11} \underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12} \underline{Z}_{21}; \quad \Delta \underline{H} = \underline{H}_{11} \underline{H}_{22} - \underline{H}_{12} \underline{H}_{21}$$

Примечание. Предполагается, что положительные направления напряжений и токов выбираются такими же, как на рис. 4-36. При других возможных направлениях или других знаках в уравнениях изменяются знаки перед некоторыми коэффициентами в таблице.

$$\dot{I}_1 = \left(\operatorname{sh} \Gamma / \sqrt{Z_{c1} Z_{c2}} \right) \dot{U}_2 + \left(\sqrt{Z_{c2}/Z_{c1}} \operatorname{ch} \Gamma \right) \dot{I}_2,$$

где Z_{c1} , Z_{c2} — характеристические сопротивления; Γ — постоянная передачи.

Сопротивление Z_{c1} равно входному при питании со стороны первичных выводов $\underline{Z}_{1\text{вх}} = \dot{U}_1/\dot{I}_1$, когда сопротивление нагрузки на вторичных выводах $\underline{Z}_{\text{н2}} = Z_{c2}$ (согласованная нагрузка), Z_{c2} равно входному при питании со стороны вторичных выводов $\underline{Z}_{2\text{вх}} = -\dot{U}_2/\dot{I}_2$, когда сопротивление нагрузки на первичных выводах $\underline{Z}_{\text{н1}} = Z_{c1}$ (согласованная нагрузка). При питании со стороны первичных выводов постоянная (мера) передачи определяется при согласованной нагрузке ($\underline{Z}_{\text{н2}} = Z_{c2}$):

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_1 \dot{I}_1}{\dot{U}_2 \dot{I}_2} = \ln \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \sqrt{\frac{Z_{c1}}{Z_{c2}}} = \\ &= \ln \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \sqrt{\frac{Z_{c2}}{Z_{c1}}} = A + jB = \\ &= \ln \left(\sqrt{A_{11} A_{22}} + \sqrt{A_{12} A_{21}} \right), \end{aligned}$$

где A (Нп) — постоянная ослабления; B (рад) — постоянная фазы.

При питании со стороны вторичных выводов получается такая же постоянная передачи.

Коэффициенты четырехполюсника выражаются через вторичные параметры:

$$\underline{A}_{11} = \sqrt{Z_{c1}/Z_{c2}} \operatorname{ch} \Gamma; \quad \underline{A}_{12} = \sqrt{Z_{c1} Z_{c2}} \operatorname{sh} \Gamma;$$

$$\underline{A}_{21} = \operatorname{sh} \Gamma / \sqrt{Z_{c1} Z_{c2}}; \quad \underline{A}_{22} = \sqrt{Z_{c2}/Z_{c1}} \operatorname{ch} \Gamma;$$

$$\underline{Y}_{11} = \operatorname{cth} \Gamma / Z_{c1}; \quad \underline{Y}_{22} = -\operatorname{cth} \Gamma / Z_{c2};$$

$$\underline{Y}_{12} = -\underline{Y}_{21} = -1 / \sqrt{Z_{c1} Z_{c2}} \operatorname{sh} \Gamma;$$

$$\underline{Z}_{11} = Z_{c1} \operatorname{cth} \Gamma; \quad \underline{Z}_{22} = -Z_{c2} \operatorname{cth} \Gamma;$$

$$\underline{Z}_{12} = -\underline{Z}_{21} = -\sqrt{Z_{c1} Z_{c2}} / \operatorname{sh} \Gamma.$$

Коэффициенты и параметры четырехполюсника могут быть определены опытным путем. Если $\underline{Z}_{1\text{х}}$ и $\underline{Z}_{1\text{к}}$ — входные сопротивления со стороны первичных выводов при разомкнутых (холостой ход) и короткозамкнутых вторичных, $\underline{Z}_{2\text{х}}$ и $\underline{Z}_{2\text{к}}$ — входные сопротивления со стороны вторичных выводов при разомкнутых и короткозамкнутых первичных, то

$$\underline{Z}_{1\text{к}}/\underline{Z}_{1\text{х}} = \underline{Z}_{2\text{к}}/\underline{Z}_{2\text{х}}$$

и

$$\underline{A}_{11} = \sqrt{\underline{Z}_{1\text{х}}/(\underline{Z}_{2\text{х}} - \underline{Z}_{2\text{к}})}; \quad \underline{A}_{12} = \underline{Z}_{2\text{к}} \underline{A}_{11};$$

$$\underline{A}_{21} = 1/\sqrt{\underline{Z}_{1\text{х}}(\underline{Z}_{2\text{х}} - \underline{Z}_{2\text{к}})};$$

$$\underline{A}_{22} = \underline{Z}_{2\text{х}} \underline{A}_{21};$$

$$\underline{Z}_{c1} = \sqrt{\underline{Z}_{1\text{к}} \underline{Z}_{1\text{х}}}; \quad \underline{Z}_{c2} = \sqrt{\underline{Z}_{2\text{к}} \underline{Z}_{2\text{х}}};$$

$$\operatorname{th} \Gamma = \sqrt{\underline{Z}_{1\text{к}}/\underline{Z}_{1\text{х}}} = \sqrt{\underline{Z}_{2\text{к}}/\underline{Z}_{2\text{х}}}.$$

Наиболее часто применяются Т- и П-образные схемы замещения.

Для Т-образной схемы замещения (рис. 4-37)

$$\underline{A}_{11} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_3}; \quad \underline{A}_{12} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2;$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_3}; \quad \underline{A}_{22} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_3};$$

$$\underline{Y}_{11} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{\rho}; \quad \underline{Y}_{12} = -\underline{Y}_{21} = -\underline{Z}_3/\rho;$$

$$\underline{Y}_{22} = -\frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}{\rho},$$

где $\rho = \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_1$;

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3; \quad \underline{Z}_{12} = -\underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_3;$$

$$\underline{Z}_{22} = -(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3); \quad \underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{21}};$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{A}_{22} - 1}{\underline{A}_{21}}; \quad \underline{Z}_3 = \frac{1}{\underline{A}_{21}}.$$

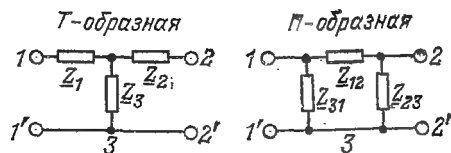


Рис. 4-37.

Рис. 4-38.

Для П-образной схемы замещения (рис. 4-38)

$$\underline{A}_{11} = \frac{\underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{23}}; \quad \underline{A}_{12} = \underline{Z}_{12};$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{23} \underline{Z}_{31}}; \quad \underline{A}_{22} = \frac{\underline{Z}_{31} + \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{31}};$$

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{\underline{Z}_{12}} + \frac{1}{\underline{Z}_{31}}; \quad \underline{Y}_{12} = -\underline{Y}_{21} =$$

$$= -\frac{1}{\underline{Z}_{12}}; \quad \underline{Y}_{22} = -\left(\frac{1}{\underline{Z}_{12}} + \frac{1}{\underline{Z}_{23}} \right);$$

$$\underline{Z}_{11} = \underline{m} \underline{Z}_{31} (\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23}); \quad \underline{Z}_{12} = -\underline{Z}_{21} =$$

$$= -\underline{m} \underline{Z}_{31} \underline{Z}_{23}; \quad \underline{Z}_{22} = -\underline{m} \underline{Z}_{23} (\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{31}),$$

где $\underline{m} = 1/(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31})$;

$$\underline{Z}_{12} = \underline{A}_{12}; \quad \underline{Z}_{23} = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11} - 1};$$

$$\underline{Z}_{31} = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22} - 1}.$$

Для простого Г-образного четырехполюсника (рис. 4-39)

$$\underline{A}_{11} = 1; \quad \underline{A}_{12} = \underline{Z}_1/2; \quad \underline{A}_{21} = 1/2\underline{Z}_2;$$

$$\underline{A}_{22} = 1 + \underline{Z}_1/4\underline{Z}_2; \quad \underline{Y}_{11} = (\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2)/2\underline{Z}_1 \underline{Z}_2;$$

$$\underline{Y}_{12} = -\underline{Y}_{21} = -2/\underline{Z}_1; \quad \underline{Y}_{22} = -2/\underline{Z}_1;$$

$$\underline{Z}_{11} = 2 \underline{Z}_2; \quad \underline{Z}_{12} = -\underline{Z}_{21} = -2\underline{Z}_2;$$

$$\underline{Z}_{22} = -(\underline{Z}_1/2 + 2\underline{Z}_2); \quad \underline{Z}_{c1} =$$

$$= \sqrt{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 / (1 + \underline{Z}_1/4\underline{Z}_2)};$$

$$\underline{Z}_{c2} = \sqrt{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 (1 + \underline{Z}_1/4\underline{Z}_2)};$$

$$\operatorname{ch} \underline{\Gamma} = \sqrt{1 + \underline{Z}_1/4\underline{Z}_2}.$$

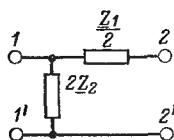


Рис. 4-39.

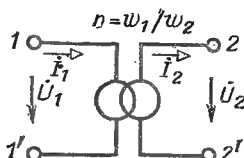


Рис. 4-40.

Для идеального трансформатора (рис. 4-40)

$$\underline{A}_{11} = n = \sqrt{\underline{Z}_{c1}/\underline{Z}_{c2}}; \quad \underline{A}_{12} = 0; \quad \underline{A}_{21} = 0;$$

$$\underline{A}_{22} = 1/n = \sqrt{\underline{Z}_{c2}/\underline{Z}_{c1}}; \quad \underline{Z}_{1\text{вх}} = n^2 \underline{Z}_{\text{н2}};$$

$$\underline{\Gamma} = 0.$$

Симметричные четырехполюсники

У симметричного четырехполюсника (например, двухпроводной однородной линии) перемена местами первичных и вторичных выводов не изменяет режима работы источника питания и приемника:

$$\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22}; \quad \underline{Y}_{11} = -\underline{Y}_{22}; \quad \underline{Z}_{11} =$$

$$= -\underline{Z}_{22} \text{ (но } \underline{H}_{11} \neq \pm \underline{H}_{22}); \quad \underline{Z}_{1\text{к}} = \underline{Z}_{2\text{к}} = \underline{Z}_{\text{к}};$$

$$\underline{Z}_{1\text{х}} = \underline{Z}_{2\text{х}} = \underline{Z}_{\text{х}}; \quad \underline{Z}_{c1} = \underline{Z}_{c2} = \underline{Z}_c.$$

Уравнения четырехполюсника и расчетные формулы упрощаются. Например, уравнения с вторичными параметрами:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\Gamma} + \underline{I}_2 \underline{Z}_c \operatorname{sh} \underline{\Gamma};$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \underline{\Gamma} + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\Gamma},$$

где при согласованной нагрузке $\underline{Z}_{\text{н}} = \underline{Z}_c$ и

$\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_c = \sqrt{\underline{A}_{12}/\underline{A}_{21}}$ и питании со стороны первичных выводов

$$\underline{\Gamma} = \ln \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \ln \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = \underline{\Lambda} + j\underline{B} =$$

$$= \ln (\underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}});$$

$$\underline{\Lambda} = \ln \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \ln \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{\underline{S}_1}{\underline{S}_2} =$$

$$= \frac{1}{2} \ln \frac{\underline{P}_1}{\underline{P}_2} [\text{Нп}];$$

$$\underline{\Lambda} = 20 \lg \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = 20 \lg \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = 10 \lg \frac{\underline{P}_1}{\underline{P}_2} [\text{дБ}];$$

$\underline{B}$ — угол сдвига фаз между напряжениями или токами на входе и выходе при согласованной нагрузке.

Коэффициенты четырехполюсника выражаются через вторичные параметры:

$$\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22} = \operatorname{ch} \underline{\Gamma}; \quad \underline{A}_{12} = \underline{Z}_c \operatorname{sh} \underline{\Gamma};$$

$$\underline{A}_{21} = \operatorname{sh} \underline{\Gamma}/\underline{Z}_c;$$

$$\underline{Y}_{11} = -\underline{Y}_{22} = \operatorname{cth} \underline{\Gamma}/\underline{Z}_c; \quad \underline{Y}_{21} = -\underline{Y}_{12} =$$

$$= 1/\underline{Z}_c \operatorname{sh} \underline{\Gamma};$$

$$\underline{Z}_{11} = -\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_c \operatorname{cth} \underline{\Gamma};$$

$$\underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_c/\operatorname{sh} \underline{\Gamma}.$$

Если известны сопротивления холостого хода $\underline{Z}_{\text{х}}$ и короткого замыкания $\underline{Z}_{\text{к}}$, то

$$\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22} = \sqrt{\underline{Z}_{\text{х}}/(\underline{Z}_{\text{х}} - \underline{Z}_{\text{к}})};$$

$$\underline{A}_{12} = \underline{Z}_{\text{к}} \sqrt{\underline{Z}_{\text{х}}/(\underline{Z}_{\text{х}} - \underline{Z}_{\text{к}})};$$

$$\underline{A}_{21} = 1/\sqrt{\underline{Z}_{\text{х}}(\underline{Z}_{\text{х}} - \underline{Z}_{\text{к}})}; \quad \underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_{\text{к}} \underline{Z}_{\text{х}}};$$

$$\operatorname{th} \underline{\Gamma} = \operatorname{th} (\underline{\Lambda} + j\underline{B}) = \sqrt{\underline{Z}_{\text{к}}/\underline{Z}_{\text{х}}} = \underline{T} e^{j\underline{\nu}};$$

$$\underline{\Lambda} = \frac{1}{2} \ln W; \quad \underline{B}_1 = \frac{\xi}{2}; \quad \underline{B}_2 = \frac{\xi}{2} + \pi$$

(два значения), где

$$W = \left| \frac{1 + \underline{T} \angle \tau}{1 - \underline{T} \angle \tau} \right|; \quad \xi = \arg \frac{1 + \underline{T} \angle \tau}{1 - \underline{T} \angle \tau}.$$

Наиболее часто применяют Т-, П-образные и мостовые (Х-образные) схемы замещения. Коэффициенты и параметры этих схем даны в табл. 4-6.

Входное сопротивление симметричного четырехполюсника при сопротивлении нагрузки $\underline{Z}_{\text{н}}$

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\underline{A}_{11} \underline{Z}_{\text{н}} + \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21} \underline{Z}_{\text{н}} + \underline{A}_{11}} = \underline{Z}_c \frac{\underline{Z}_{\text{н}} + \underline{Z}_c \operatorname{th} \underline{\Gamma}}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_{\text{н}} \operatorname{th} \underline{\Gamma}} =$$

$$= \underline{Z}_{\text{х}} \frac{\underline{Z}_{\text{н}} + \underline{Z}_{\text{к}}}{\underline{Z}_{\text{н}} + \underline{Z}_{\text{х}}}.$$

В частности,

$$\underline{Z}_{\text{х}} = \underline{Z}_c \operatorname{cth} \underline{\Gamma}; \quad \underline{Z}_{\text{к}} = \underline{Z}_c \operatorname{th} \underline{\Gamma}.$$

Коэффициенты и параметры симметричных четырехполюсников и линий

Схема	Коэффициенты			Параметры	Сопротивления
	$\underline{A}$	$\underline{Y}$	$\underline{Z}$		
	$\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2};$ $\underline{A}_{12} = \underline{Z}_1 \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2} \right);$ $\underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_2}$	$\underline{Y}_{11} = -\underline{Y}_{22} = \frac{2\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2)};$ $\underline{Y}_{21} = -\underline{Y}_{12} = \frac{4\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2)}$	$\underline{Z}_{11} = -\underline{Z}_{22} = \frac{\underline{Z}_1}{2} + \underline{Z}_2;$ $\underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_2$	$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2} \right)};$ $\operatorname{ch} \underline{\Gamma} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2};$ $\operatorname{sh} \frac{\underline{\Gamma}}{2} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2}}$	$\frac{\underline{Z}_1}{2} = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{21}} =$ $= \underline{Z}_c \frac{\operatorname{ch} \frac{\underline{\Gamma}}{2} - 1}{\operatorname{sh} \frac{\underline{\Gamma}}{2}} = \underline{Z}_c \operatorname{th} \frac{\underline{\Gamma}}{2};$ $\underline{Z}_2 = \frac{1}{\underline{A}_{21}} = \frac{\underline{Z}_c}{\operatorname{sh} \frac{\underline{\Gamma}}{2}}$
	$\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2};$ $\underline{A}_{12} = \underline{Z}_1;$ $\underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_2} \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2} \right)$	$\underline{Y}_{11} = -\underline{Y}_{22} = \frac{1}{2\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_1};$ $\underline{Y}_{21} = -\underline{Y}_{12} = \frac{1}{\underline{Z}_1}$	$\underline{Z}_{11} = -\underline{Z}_{22} = \frac{(2\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2) \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2};$ $\underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_{12} = \frac{4\underline{Z}_2^2}{\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2}$	$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{1 + \underline{Z}_1 / 4\underline{Z}_2}};$ $\operatorname{ch} \underline{\Gamma} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2};$ $\operatorname{sh} \frac{\underline{\Gamma}}{2} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2}}$	$\underline{Z}_1 = \underline{A}_{12} = \underline{Z}_c \operatorname{sh} \underline{\Gamma};$ $2\underline{Z}_2 = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11} - 1} = \frac{\underline{Z}_c \operatorname{sh} \underline{\Gamma}}{\operatorname{ch} \underline{\Gamma} - 1}$ $= \underline{Z}_c \operatorname{cth} \frac{\underline{\Gamma}}{2}$
	$\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1};$ $\underline{A}_{12} = \frac{2\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1};$ $\underline{A}_{21} = \frac{2}{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}$	$\underline{Y}_{11} = -\underline{Y}_{22} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2 \underline{Z}_1};$ $\underline{Y}_{21} = -\underline{Y}_{12} = \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2 \underline{Z}_1}$	$\underline{Z}_{11} = -\underline{Z}_{22} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{2};$ $\underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}{2}$	$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2};$ $\operatorname{ch} \underline{\Gamma} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1};$ $\operatorname{th} \frac{\underline{\Gamma}}{2} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2}}$	$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{21}} = \underline{Z}_c \operatorname{th} \frac{\underline{\Gamma}}{2};$ $\underline{Z}_2 = \frac{\underline{A}_{11} + 1}{\underline{A}_{21}} = \underline{Z}_c \operatorname{cth} \frac{\underline{\Gamma}}{2}$

Название фильтра	Схема	Полоса пропускания	Постоянная ослабления А	Постоянная фазы В	Характеристическое сопротивление	L и C при заданном параметре k и частотах f_1 и f_2
Низкочастотный $k = \sqrt{\frac{L}{C}}$		$f_1 < f < f_2$; $f_1 = 0$; $f_2 = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}}$	$\operatorname{ch} \frac{A}{2} = \frac{f}{f_2}$	$\sin \frac{B}{2} = \frac{f}{f_2}$	$k \sqrt{1 - f^2/f_2^2}$ $\frac{k}{\sqrt{1 - f^2/f_2^2}}$	$L = \frac{k}{\pi f_2}$; $C = \frac{1}{\pi f_2 k}$
Высокочастотный $k = \sqrt{\frac{L}{C}}$		$f_1 \ll f \ll f_2$; $f_1 = \frac{1}{4\pi \sqrt{LC}}$; $f_2 = \infty$	$\operatorname{ch} \frac{A}{2} = \frac{f_1}{f}$	$\sin \frac{B}{2} = -\frac{f_1}{f}$	$k \sqrt{1 - f_1^2/f^2}$ $\frac{k}{\sqrt{1 - f_1^2/f^2}}$	$L = \frac{k}{4\pi f_1}$; $C = \frac{1}{4\pi f_1 k}$
Полосовой $k = \sqrt{\frac{L_2}{C_1}}$		$f_1 \ll f \ll f_2$; $f_{1,2} = f_0 (\sqrt{1+n^2} \mp n)$; $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_2}}$; $n^2 = \frac{L_2}{L_1} = \frac{C_1}{C_2}$; $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$	$\operatorname{ch} A = \frac{(f/f_0 - f_0/f)^2}{2n^2} - 1$	$\cos B = 1 - \frac{(f/f_0 - f_0/f)^2}{2n^2}$	$k \sqrt{1 - \frac{(f/f_0 - f_0/f)^2}{4n^2}}$ $\frac{k}{\sqrt{1 - \frac{(f/f_0 - f_0/f)^2}{4n^2}}}$	$L_1 = \frac{k}{\pi (f_2 - f_1)}$; $C_1 = \frac{f_2 - f_1}{4\pi k f_2 f_1}$; $L_2 = \frac{k (f_2 - f_1)}{4\pi f_2 f_1}$; $C_2 = \frac{1}{\pi k (f_2 - f_1)}$

Продолжение табл. 4-7

Название фильтра	Схема	Полоса пропускания	Постоянная ослабления А	Постоянная фазы В	Характеристическое сопротивление	L и C при заданном параметре k и частотах f_1 и f_2
Заграждающий $k = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}$		$0 \ll f \ll f_1$; $f_2 \ll f \ll \infty$; $f_{1,2} = f_0 \frac{\sqrt{1+16n^2} \mp 1}{4n}$; $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_2}}$; $n^2 = \frac{L_2}{L_1} = \frac{C_1}{C_2}$; $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$	$\operatorname{ch} A = \frac{1}{2n^2 (f/f_0 - f_0/f)^2} - 1$	$\cos B = 1 - \frac{1}{2n^2 (f/f_0 - f_0/f)^2}$	$k \sqrt{1 - \frac{1}{4n^2 (f/f_0 - f_0/f)^2}}$ $\frac{k}{\sqrt{1 - \frac{1}{4n^2 (f/f_0 - f_0/f)^2}}}$	$L_1 = \frac{(f_2 - f_1) k}{\pi f_2 f_1}$; $C_1 = \frac{1}{4\pi k (f_2 - f_1)}$; $L_2 = \frac{k}{4\pi (f_2 - f_1)}$; $C_2 = \frac{f_2 - f_1}{\pi k f_2 f_1}$

- Примечания: 1. Полоса пропускания определена при согласованной нагрузке.
 2. В полосе пропускания постоянная ослабления $A=0$.
 3. В полосе непропускания постоянная фазы $B=+180^\circ$ или -180° .
 4. Индуктивность L и емкость C — соответственно в генри и фарадах при частоте в герцах.

Продолжение табл. 4-7

Название фильтра	Схема	Полоса пропускания	Постоянная ослабления А	Постоянная фазы В	Характеристическое сопротивление	L и C при заданном параметре k и частотах f ₁ и f ₂
Заграждающий $k = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}$		$0 \leq f \leq f_1; f_2 \leq f < \infty;$ $f_{1,2} = f_0 \frac{\sqrt{1+16n^2} \pm 1}{4n};$ $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_2}}; n^2 = \frac{2\pi \sqrt{L_2 C_2}}{L_1};$ $= \frac{L_2}{L_1} = \frac{C_1}{C_2}; f_0 = \sqrt{f_{1,2}}$	$\text{ch } A = \frac{1}{2n^2 (f/f_0 - f_0/f)^2} - 1$	$\cos B = 1 - \frac{1}{2n^2 (f/f_0 - f_0/f)^2}$	$k \sqrt{1 - \frac{1}{4n^2 (f/f_0 - f_0/f)^2}};$ $\frac{1}{k}$	$L_1 = \frac{(f_2 - f_1) k}{\pi f_1 f_2};$ $C_1 = \frac{1}{4\pi k(f_2 - f_1)};$ $L_2 = \frac{1}{4\pi k(f_2 - f_1)};$ $C_2 = \frac{f_2 - f_1}{\pi k f_2 f_1}$

Примечания: 1. Полоса пропускания определена при согласованной нагрузке.

2. В полосе пропускания постоянная ослабления $A=0$.

3. В полосе не пропускания постоянная фаза $B=+180^\circ$ или -180° .

4. Индуктивность L и емкость C — соответственно в генри и фарадах при частоте в герцах.

Фильтры

В табл. 4-7 приведены расчетные формулы Т- и П-образных звеньев фильтров типа k , у которых произведение суммарного продольного сопротивления $\underline{Z}_1$ на суммарное поперечное $\underline{Z}_2$ не зависит от частоты, т. е. $\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 = k^2$. У Т-образного полузвена постоянные ослабления A_T и фазы B_T вдвое меньше, чем А и В у Т- или П-образного звена, характеристическое сопротивление $\underline{Z}_{c1}$ такое же, как у П-образного, и $\underline{Z}_{c2}$ такое же, как у Т-образного.

Цепные схемы и другие соединения четырехполюсников

Чаще всего встречается каскадное соединение четырехполюсников, когда входные выводы последующего соединяются с выходными предыдущего. Каскадное соединение нескольких одинаковых четырехполюсников — звеньев образует цепную схему (цепочку).

Связь напряжений и токов всей цепочки удобно записывать с вторичными параметрами: $\underline{Z}_n$ — характеристическое сопротивление цепочки и $\underline{\Gamma}_n$ — постоянная передачи цепочки, так как они просто выражаются через $\underline{Z}_c$ и $\underline{\Gamma}$ звена: $\underline{Z}_n = \underline{Z}_c$ и $\underline{\Gamma}_n = n\Gamma$, где n — число звеньев.

Напряжение и ток на входе:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \text{ch } \underline{\Gamma}_n + \dot{I}_2 \underline{Z}_n \text{sh } \underline{\Gamma}_n;$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_n} \text{sh } \underline{\Gamma}_n + \dot{I}_2 \text{ch } \underline{\Gamma}_n,$$

где $\dot{U}_2, \dot{I}_2$ — напряжение и ток на выходе.

Чтобы найти напряжение и ток не на входе цепочки, а на выходе k -го промежуточного звена, надо в уравнениях заменить $\underline{\Gamma}_n$ на $(n-k)\underline{\Gamma}$.

При соединении в каскад несимметричных четырехполюсников часто выполняется принцип согласования. Это значит, что $\underline{Z}_{c2}$ каждого предыдущего четырехполюсника равно $\underline{Z}_{c1}$ следующего за ним. Если последний четырехполюсник имеет согласованную нагрузку, т. е. для него $\underline{Z}_n = \underline{Z}_{c2}$, то все соединение имеет согласованную нагрузку: входное сопротивление $\underline{Z}_{\text{вх}}$ равно $\underline{Z}_{c1}$ первого четырехполюсника и постоянная передачи равна сумме постоянных всех четырехполюсников.

При соединении в каскад произвольных четырехполюсников (рис. 4-41, а) определение параметров или коэффициентов соединения усложняется и проще выполняется методами матричного исчисления или с применением сигнальных графов.

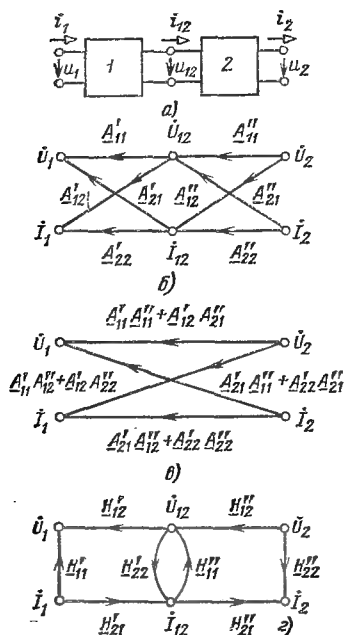


Рис. 4-41.

Пример. Два четырехполюсника с коэффициентами $\underline{A}_{11}', \underline{A}_{12}', \underline{A}_{21}', \underline{A}_{22}'$ и $\underline{A}_{11}'', \underline{A}_{12}'', \underline{A}_{21}'', \underline{A}_{22}''$ соединены в каскад (рис. 4-41, а). Найти коэффициенты полученного результирующего четырехполюсника.

Уравнения первого и второго четырехполюсников в матричной форме

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A}_{11}' & \underline{A}_{12}' \\ \underline{A}_{21}' & \underline{A}_{22}' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{I}_{12} \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{I}_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A}_{11}'' & \underline{A}_{12}'' \\ \underline{A}_{21}'' & \underline{A}_{22}'' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix},$$

где

$$\|\underline{A}_1\| = \begin{pmatrix} \underline{A}_{11}' & \underline{A}_{12}' \\ \underline{A}_{21}' & \underline{A}_{22}' \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \|\underline{A}_2\| = \begin{pmatrix} \underline{A}_{11}'' & \underline{A}_{12}'' \\ \underline{A}_{21}'' & \underline{A}_{22}'' \end{pmatrix},$$

откуда

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = \|\underline{A}_1\| \cdot \|\underline{A}_2\| \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}.$$

Для полученного четырехполюсника

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = \|\underline{A}\| \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}, \quad \text{т. е.} \quad \|\underline{A}\| = \|\underline{A}_1\| \cdot \|\underline{A}_2\|$$

или

$$\begin{pmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A}_{11}' & \underline{A}_{12}' \\ \underline{A}_{21}' & \underline{A}_{22}' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{A}_{11}'' & \underline{A}_{12}'' \\ \underline{A}_{21}'' & \underline{A}_{22}'' \end{pmatrix}.$$

По правилу умножения матриц

$$\underline{A}_{11} = \underline{A}_{11}' \underline{A}_{11}'' + \underline{A}_{12}' \underline{A}_{21}'';$$

$$\underline{A}_{12} = \underline{A}_{11}' \underline{A}_{12}'' + \underline{A}_{12}' \underline{A}_{22}'';$$

$$\underline{A}_{21} = \underline{A}_{21}' \underline{A}_{11}'' + \underline{A}_{22}' \underline{A}_{21}'';$$

$$\underline{A}_{22} = \underline{A}_{21}' \underline{A}_{12}'' + \underline{A}_{22}' \underline{A}_{22}''.$$

Те же значения коэффициентов соединения $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{12}, \underline{A}_{21}, \underline{A}_{22}$ получаются при помощи сигнальных графов. На рис. 4-41, б показаны графы первого и второго четырехполюсников и в соответствии с рис. 4-41, а объединены истоки первого и стоки второго четырехполюсников в промежуточные узлы $\dot{U}_{12}$ и $\dot{I}_{12}$. После устранения этих промежуточных узлов по правилам, показанным на рис. 4-19, б и рис. 4-21, а, получается граф по рис. 4-41, в.

На рис. 4-41, г показаны графы первого и второго четырехполюсников, когда для каждого из них записана четвертая система уравнений. Элементы матрицы $\underline{H}$ нового четырехполюсника можно определить и без преобразования графа по топологической формуле (Мэзона).

Граф имеет один контур из ветвей с передачами $\underline{H}_{22}'$ и $\underline{H}_{11}''$, т. е. определитель $\underline{\Delta} = 1 - \underline{H}_{22}' \underline{H}_{11}''$. При определении, например, элемента $\underline{H}_{11} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1$ нужно еще вычислить передачи $\underline{P}_1$ прямых путей между истоком $\dot{I}_1$ и стоком $\dot{U}_1$ и определители $\underline{\Delta}_k$. Между истоком $\dot{I}_1$ и стоком $\dot{U}_1$ два прямых пути: первый с передачей $\underline{P}_1 = \underline{H}_{11}'$ и с определителем $\underline{\Delta}_1 = 1 - \underline{H}_{22}' \underline{H}_{11}''$ (контур не касается первого прямого пути) и второй с передачей $\underline{P}_2 = \underline{H}_{21}' \underline{H}_{11}'' \underline{H}_{12}'$ и определителем $\underline{\Delta}_2 = 1$ (нет несовпадающих контуров). Следовательно,

$$\underline{H}_{11} = (\underline{P}_1 \underline{\Delta}_1 + \underline{P}_2 \underline{\Delta}_2) / \underline{\Delta}.$$

Аналогично определяются элементы $\underline{H}_{12}, \underline{H}_{21}, \underline{H}_{22}$.

Топологическую формулу можно применить и при вычислении коэффициентов матрицы $\underline{A}$ и других матриц четырехполюсника. Элементы матрицы $\underline{H}$ можно найти и путем устранения из графа рис. 4-41, г промежуточных узлов $\dot{U}_{12}$ и $\dot{I}_{12}$.

Четырехполюсники могут соединяться не только в каскад, но и параллельно (рис. 4-42, соединены соответственно выводы 1 и

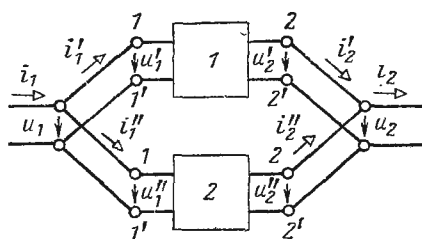


Рис. 4-42.

1, 1' и 1'', 2 и 2, 2' и 2'' обоих четырехполюсников), последовательно (соединены соответственно выводы 1' — первого и 1 — второго, 2' — первого и 2 — второго), последовательно-параллельно (первичные выводы соединены как при последовательном, а вторичные — как при параллельном соединении) и параллельно-последовательно. Для определения параметров или коэффициентов соединения целесообразно пользоваться

матричным исчислением, выбирая уравнения четырехполюсника в наиболее удобной форме.

При этих соединениях четырехполюсников необходимо следить, чтобы не нарушалось равенство токов на выводах 1 и 1' первого четырехполюсника, на выводах 2 и 2' первого четырехполюсника и аналогично у второго (регулярность соединения).

Пример. Два четырехполюсника соединены параллельно (рис. 4-42). Выполняются равенства

$$\dot{U}_1 = \dot{U}'_1 = \dot{U}''_1; \quad I_1 = I'_1 + I''_1; \quad \dot{U}_2 = \dot{U}'_2 = \dot{U}''_2; \\ I_2 = I'_2 + I''_2.$$

Наиболее удобна форма записи уравнений с проводимостями. Для составляющих четырехполюсников

$$\| I' \| = \| Y' \| \cdot \| \dot{U}' \| \text{ и } \| I'' \| = \| Y'' \| \cdot \| \dot{U}'' \|,$$

где

$$\| I' \| = \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix}; \quad \| \dot{U}' \| = \begin{bmatrix} \dot{U}'_1 \\ \dot{U}'_2 \end{bmatrix}; \\ \| Y' \| = \begin{bmatrix} Y'_{11} & Y'_{12} \\ Y'_{21} & Y'_{22} \end{bmatrix},$$

и аналогично для второго.

Для нового четырехполюсника

$$\| I \| = \| Y \| \cdot \| \dot{U} \|,$$

где

$$\| I \| = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}; \quad \| \dot{U} \| = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}; \\ \| Y \| = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}.$$

Но $\| I \| = \| I' \| + \| I'' \|$ или

$$\| I \| = \| Y' \| \cdot \| \dot{U}' \| + \| Y'' \| \cdot \| \dot{U}'' \| = \\ = \| Y' + Y'' \| \cdot \| \dot{U} \|,$$

так как $\| \dot{U} \| = \| \dot{U}' \| = \| \dot{U}'' \|$. Следовательно,

$$\| Y \| = \| Y' + Y'' \| \text{ и по правилу сложения матриц} \\ Y_{11} = Y'_{11} + Y''_{11}; \quad Y_{12} = Y'_{12} + Y''_{12} \text{ и т. д.}$$

При расчете коэффициентов четырехполюсника, эквивалентного регулярному соединению, можно объединять графы с соблюдением правила: сток — напряжение и (или) сток — ток одного объединяются соответственно с истоком — напряжением и (или) истоком — током другого для образования связи, которая получается при соединении четырехполюсников.

Линия с потерями

Первичные параметры однородной линии r_0 (Ом/км), L_0 (Гн/км), g_0 (См/км), C_0 (Ф/км) — активное сопротивление, индуктивность, активная проводимость и ем-

кость на 1 км длины (можно задавать и на любую другую единицу длины).

Вторичные параметры — волновое (характеристическое) сопротивление и коэффициент распространения:

$$\underline{Z}_B = z_B \angle \theta = \sqrt{\underline{Z}_0 / \underline{Y}_0};$$

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0},$$

где $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$; $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$; α — коэффициент ослабления (Нп/км); β — коэффициент фазы (рад/км).

Определение постоянных линий по опытам холостого хода и короткого замыкания

Если в начале линии измерить напряжение и ток при холостом ходе (разомкнуты выводы в конце линии) U_{1x} и I_{1x} , при коротком замыкании U_{1k} и I_{1k} , а также углы сдвига фаз $\angle \dot{U}_{1x}$, $\angle I_{1x}$ и $\angle \dot{U}_{1k}$, $\angle I_{1k}$, то можно вычислить все параметры линии:

$$\underline{Z}_x = \dot{U}_{1x} / I_{1x}; \quad \underline{Z}_k = \dot{U}_{1k} / I_{1k};$$

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\underline{Z}_k \underline{Z}_x} = r_B + jx_B = z_B \angle \theta;$$

$$\text{th } \underline{\gamma} l = \text{th } (\alpha + j\beta) l = \sqrt{\underline{Z}_k / \underline{Z}_x};$$

$$r_0 = \alpha r_B - \beta x_B; \quad x_0 = \omega L_0 = \beta r_B + \alpha x_B;$$

$$g_0 = \frac{\alpha r_B + \beta x_B}{z_B^2}; \quad b_0 = \omega C_0 = \frac{\beta r_B - \alpha x_B}{z_B^2}.$$

О вычислении αl и βl по найденному значению $\text{th } \underline{\gamma} l$ см. «Симметричные четырехполюсники».

Если заданы (известны) напряжение $\dot{U}_2$ и ток $\dot{I}_2$ в конце линии, то напряжение и ток в любом поперечном сечении (точке) линии

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \text{ch } \underline{\gamma} x + \dot{I}_2 \underline{Z}_B \text{sh } \underline{\gamma} x;$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} \text{sh } \underline{\gamma} x + \dot{I}_2 \text{ch } \underline{\gamma} x,$$

где x — расстояние от конца линии до данной точки.

Последние уравнения могут быть записаны иначе, если заменить гиперболические функции показательными:

$$\dot{U} = \dot{B}_1 e^{\underline{\gamma} x} + \dot{B}_2 e^{-\underline{\gamma} x} = \dot{U}_{\text{пад}} + \dot{U}_{\text{отр}};$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{B}_1}{\underline{Z}_B} e^{\underline{\gamma} x} - \frac{\dot{B}_2}{\underline{Z}_B} e^{-\underline{\gamma} x} = \dot{I}_{\text{пад}} - \dot{I}_{\text{отр}},$$

где

$$\dot{B}_1 = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_B}{2}; \quad \dot{B}_2 = \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_B}{2},$$

т. е. напряжение и ток в каждой точке можно представить как сумму падающей и от-

раженной волн, а волновое сопротивление

$$\underline{Z}_B = \dot{U}_{\text{пад}} / \dot{I}_{\text{пад}} = \dot{U}_{\text{отр}} / \dot{I}_{\text{отр}}.$$

Фазовая скорость волны

$$c = \omega / \beta = \lambda / T = \lambda f,$$

где λ — длина волны; f — частота тока; T — период.

При сопротивлении нагрузки $\underline{Z}_H$ коэффициент отражения

$$\underline{\rho} = \frac{\dot{B}_2}{\dot{B}_1} = \frac{\dot{U}_{\text{отр}2}}{\dot{U}_{\text{пад}2}} = \frac{\dot{I}_{\text{отр}2}}{\dot{I}_{\text{пад}2}} = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_B}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_B}.$$

При согласованной нагрузке $\underline{Z}_H = \underline{Z}_B$ отраженной волны нет:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 e^{\gamma x}; \quad \dot{I} = \dot{I}_2 e^{\gamma x} = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} e^{\gamma x};$$

КПД линии

$$\eta = P_2 / P_1 = (U_2 I_2 \cos \theta) / (U_1 I_1 \cos \theta) = e^{-2\alpha l};$$

входное сопротивление $\underline{Z}_{\text{вх}} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 = \underline{Z}_B$.

При произвольной нагрузке входное сопротивление линии

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{вх}} &= \underline{Z}_B \frac{\underline{Z}_H + \underline{Z}_B \operatorname{th} \gamma l}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_H \operatorname{th} \gamma l} = \\ &= \underline{Z}_B \frac{1 + \rho e^{-2\gamma l}}{1 - \rho e^{-2\gamma l}}, \end{aligned}$$

где l — длина линии.

Если линия состоит из двух участков с различными параметрами, то сначала нужно вычислить входное сопротивление второго участка. Входное сопротивление всей линии рассчитывается как входное сопротивление первого участка с сопротивлением нагрузки, равным входному сопротивлению второго участка. Аналогично рассчитывается входное сопротивление линии, состоящей из нескольких участков.

Схемы замещения линии даны в табл. 4-6.

Упрощенные формулы

Элементы схемы замещения можно выразить через $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$, $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$ и длину линии l .

Для Т-образной схемы

$$\underline{Z}_1/2 = \underline{Z}_0 \underline{I} \underline{H}_1; \quad \underline{Y}_2 = 1/\underline{Z}_2 = \underline{Y}_0 \underline{I} \underline{H}_2.$$

Для П-образной схемы

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_0 \underline{I} \underline{H}_2; \quad \underline{Y}_2/2 = 1/2 \underline{Z}_2 = \underline{Y}_0 \underline{I} \underline{H}_1.$$

Для Х-образной схемы

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_0 \underline{I} \underline{H}_1; \quad \underline{Y}_2 = \underline{Y}_0 \underline{I} \underline{H}_1.$$

Здесь

$$\begin{aligned} \underline{H}_1 &= \left(\operatorname{th} \frac{\gamma l}{2} \right) / \gamma l = \frac{1}{2} - \frac{(\gamma l)^2}{24} + \\ &+ \frac{(\gamma l)^4}{240} - \frac{(\gamma l)^6}{2370} + \dots; \end{aligned}$$

$$\underline{H}_2 = \frac{\operatorname{sh} \gamma l}{\gamma l} = 1 + \frac{(\gamma l)^2}{3!} + \frac{(\gamma l)^4}{5!} + \frac{(\gamma l)^6}{7!} + \dots$$

Легко оценить ошибку при приближенном расчете, когда отбрасываются члены ряда, начиная с выбранной наивысшей степени γl .

Упрощенные формулы применяются и при расчете режима линии.

Если в уравнениях длинной линии $\operatorname{sh} \gamma l$ и $\operatorname{ch} \gamma l$ заменить соответствующими рядами, ограничиваясь первыми двумя членами, что допустимо, когда третий член разложения мал, то

$$\operatorname{sh} \gamma l \approx \gamma l + \frac{(\gamma l)^3}{3!}; \quad \operatorname{ch} \gamma l \approx 1 + \frac{(\gamma l)^2}{2!};$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 l \underline{Y}_0 l}{2} \right) + \\ &+ \dot{I}_2 \underline{Z}_0 l \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 l \underline{Y}_0 l}{6} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U}_2 \underline{Y}_0 l \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 l \underline{Y}_0 l}{6} \right) + \\ &+ \dot{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 l \underline{Y}_0 l}{2} \right). \end{aligned}$$

При $f=50$ Гц и $l \leq 200$ км эти формулы дают погрешность менее 2%.

Примечания: 1. Для однородной линии справедливы все расчетные формулы симметричного четырехполюсника, если в них положить $\underline{\Gamma} = \underline{\gamma} l$.

2. Все формулы применимы к трехфазным симметричным линиям, причем U , I — фазные напряжение и ток; r_0 , L_0 , g_0 , C_0 — параметры на одну фазу.

Линия с малыми потерями

Если $\omega L_0 / r_0 > 5$ и $\omega C_0 / g_0 > 5$, то для расчета вторичных параметров можно пользоваться приближенными формулами:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{L_0 / C_0}; \quad \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0};$$

$$\alpha = \frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{g_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}.$$

Линия без потерь

Если можно считать $r_0 \approx 0$; $g_0 \approx 0$ (т. е. $r_0 / \omega L_0 \ll 1$; $g_0 / \omega C_0 \ll 1$), то $\alpha = 0$; $\underline{\gamma} = j\beta$;

$$\beta = 2\pi/\lambda = \omega \sqrt{L_0 C_0}; \quad \underline{Z}_B = z_B = \sqrt{L_0/C_0};$$

$$c = \omega/\beta = 1/\sqrt{L_0 C_0} = 1/\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0},$$

где ϵ_r и μ_r — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды между проводниками линии;

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cos \beta x + j \underline{I}_2 z_B \sin \beta x;$$

$$\underline{I} = j \frac{\underline{U}_2}{z_B} \sin \beta x + \underline{I}_2 \cos \beta x;$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{BX} &= z_B \frac{\underline{Z}_H + j z_B \operatorname{tg} \beta l}{z_B + j \underline{Z}_H \operatorname{tg} \beta l} = \\ &= z_B \frac{1 + \rho e^{-j2\beta l}}{1 - \rho e^{-j2\beta l}}. \end{aligned}$$

При чисто реактивной нагрузке, т. е. $\underline{Z}_H = jx_H$, при коротком замыкании $\underline{Z}_H = 0$ и холостом ходе $\underline{Z}_H = \infty$ в линии образуются стоячие волны, а входное сопротивление получается чисто реактивным. При $\underline{Z}_H = 0$ получается $\underline{Z}_K = jz_B \operatorname{tg} \beta l$; при $\underline{Z}_H = \infty$ получается $\underline{Z}_X = -jz_B \operatorname{ctg} \beta l$.

При согласованной нагрузке $\underline{Z}_H = r_H = z_B$ устанавливается режим бегущей волны:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 e^{j\beta x}; \quad \underline{I} = \underline{I}_2 e^{j\beta x} = \frac{\underline{U}_2}{z_B} e^{j\beta x}.$$

Степень рассогласования нагрузки оценивается коэффициентом бегущей волны

$$k_6 = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{U_{2\text{пад}} - U_{2\text{отр}}}{U_{2\text{пад}} + U_{2\text{отр}}} = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|}$$

или коэффициентом стоячей волны $k_c = 1/k_6$. Здесь $U_{\min}$, $U_{\max}$ — минимальное и максимальное значения напряжения (между ближайшими точками, в которых наблюдаются $U_{\min}$ и $U_{\max}$, расстояние равно $\lambda/4$).

Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами

Волны в линии возникают в результате различных коммутаций (подключение или отключение источников питания, приемников и т. д.) и под действием атмосферных явлений.

При подключении к линии источника напряжения в линии возникает волна с напряжением той же формы.

При подключении к линии без потерь источника, внутренним сопротивлением которого нельзя пренебречь, а также при наличии нагрузки на входе линии форма возникающей волны может отличаться от формы ЭДС источника. Напряжение $u_{\text{пад}}$ и ток $i_{\text{пад}}$ возникающей волны определяются по схеме замещения, на которой линия представлена своим волновым сопротивлением z_B .

Пример. Источник (E , $r_{\text{вт}}$, L) подключается к линии без потерь (z_B), на входных выводах $1-1'$ которой есть и приемник с сопротивлением r (рис. 4-43, а).

Для определения $u_{\text{пад}}$, $i_{\text{пад}}$ составлена схема замещения (рис. 4-43, б). Рассчитав переходный процесс в этой схеме любым из известных методов, можно найти ток $i_{\text{пад}}$ и напряжение $u_{\text{пад}} = z_B i_{\text{пад}}$. Например, при $r = z_B = 2r_{\text{вт}} = R$ ток (время отсчитывается от момента мгновенного замыкания рубильника)

$$i_{\text{пад}} = \frac{E}{2R} (1 - e^{-\delta t}),$$

где $\delta = R/L$.

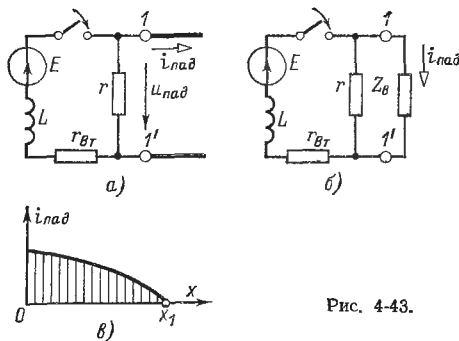


Рис. 4-43.

На рис. 4-43, в показан график распределения тока вдоль линии в момент t_1 , когда волна прошла путь $x_1 = ct_1$.

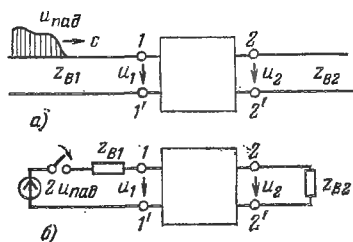


Рис. 4-44.

Для воздушных линий (без потерь) скорость волны $c = c_0 = 3 \cdot 10^5$ км/с, для кабелей $c = c_0/\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$.

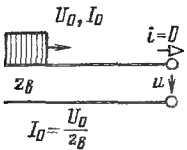
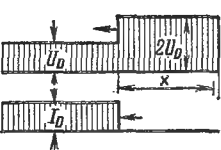
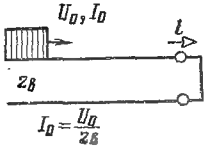
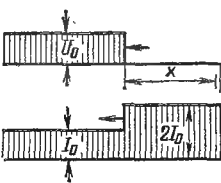
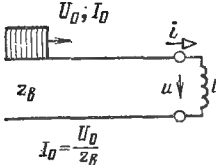
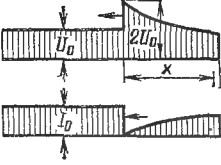
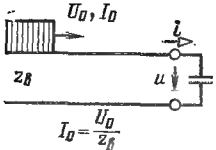
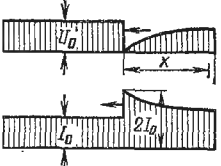
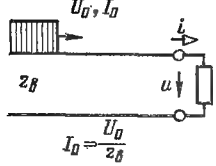
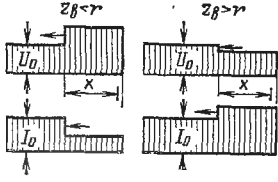
При движении волны по однородной линии без потерь форма волны не изменяется. Когда волна достигнет конца линии, возникает новая (отраженная) волна, форма которой зависит и от характера нагрузки в конце линии. Если волна достигает места соединения двух линий, то возникают две новые волны: отраженная и проходящая во вторую линию.

Напряжения и токи отраженной и проходящей волн можно определить по схеме замещения.

На рис. 4-44, б дана схема замещения для общего случая отражения волны в месте соединения двух линий (рис. 4-44, а), когда в месте соединения включены еще

Таблица 4-8

Отражение волн прямоугольной формы от конца линии

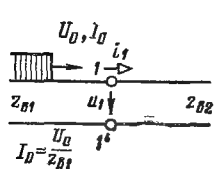
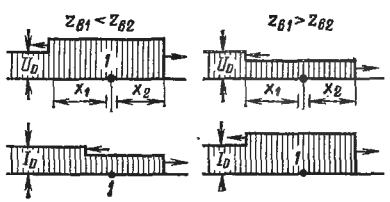
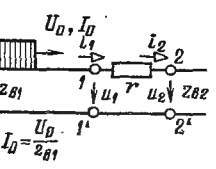
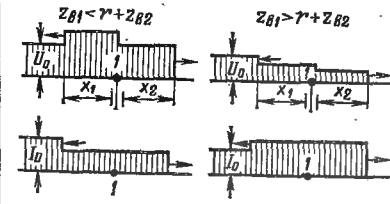
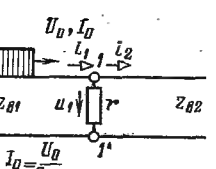
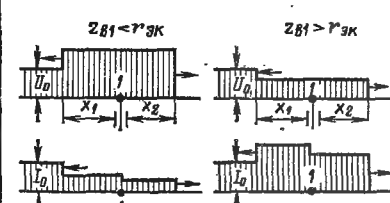
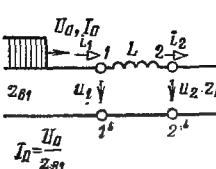
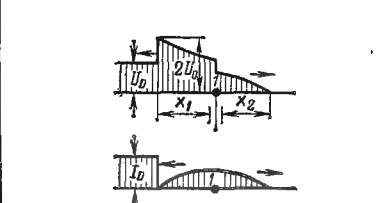
Нагрузка в конце линии	Распределение напряжения и тока	Закон изменения напряжения и тока в конце линии
 $I_0 = \frac{U_0}{z_B}$		$u = 2U_0; \quad i = 0$
 $I_0 = \frac{U_0}{z_B}$		$u = 0; \quad i = 2I_0$
 $I_0 = \frac{U_0}{z_B}$		$u = 2U_0 e^{pt}; \quad p = -z_B/L;$ $i = 2I_0 (1 - e^{pt})$
 $I_0 = \frac{U_0}{z_B}$		$u = 2U_0 (1 - e^{pt});$ $i = 2I_0 e^{pt}; \quad p = -1/z_B C$
 $I_0 = \frac{U_0}{z_B}$		$u = \frac{2U_0 r}{z_B + r};$ $i = \frac{2I_0 z_B}{z_B + r}$

Примечания: 1. Время t отсчитывается от момента, когда падающая волна (U_0, I_0) достигает конца линии (первое отражение). Предполагается, что за время t следующие отражения волн еще не наступили.

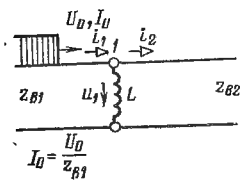
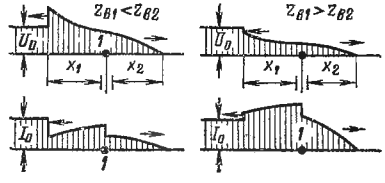
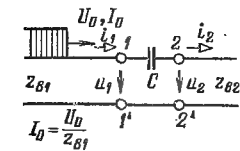
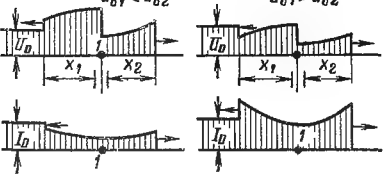
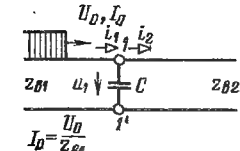
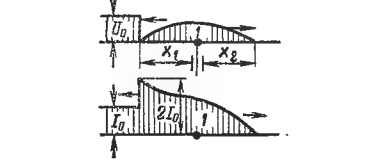
2. Чтобы получить закон распределения напряжения и тока вдоль линии, когда волна, отразившись от конца линии, прошла путь x , нужно в выражениях для u и i заменить t на $t - x/c$, где c — скорость движения волны.

Таблица 4-9

Падение волны прямоугольной формы на узел соединения двух линий

Схема соединения линий	Распределение напряжений и токов	Закон изменения напряжений и токов в месте соединения линий
 U_0, I_0 z_{B1} u_1 z_{B2} $I_0 = \frac{U_0}{z_{B1}}$	 $z_{B1} < z_{B2}$ $z_{B1} > z_{B2}$	$u_1 = \frac{2U_0 z_{B2}}{z_{B1} + z_{B2}};$ $i_1 = \frac{2I_0 z_{B1}}{z_{B1} + z_{B2}}$
 U_0, I_0 z_{B1} u_1 r z_{B2} $I_0 = \frac{U_0}{z_{B1}}$	 $z_{B1} < r + z_{B2}$ $z_{B1} > r + z_{B2}$	$u_1 = \frac{2U_0 (r + z_{B2})}{z_{B1} + r + z_{B2}};$ $u_2 = \frac{2U_0 z_{B2}}{z_{B1} + r + z_{B2}};$ $i_1 = i_2 = \frac{2I_0 z_{B1}}{z_{B1} + r + z_{B2}}$
 U_0, I_0 z_{B1} u_1 r z_{B2} $I_0 = \frac{U_0}{z_{B1}}$	 $z_{B1} < r_{BK}$ $z_{B1} > r_{BK}$	$u_1 = u_2 = \frac{2U_0 r_{BK}}{z_{B1} + r_{BK}};$ $i_1 = \frac{2I_0 z_{B1}}{z_{B1} + r_{BK}};$ $r_{BK} = \frac{r z_{B2}}{r + z_{B2}};$ $i_2 = \frac{2I_0 r_{BK}}{z_{B1} + r_{BK}} \cdot \frac{z_{B1}}{z_{B2}}$
 U_0, I_0 z_{B1} u_1 L z_{B2} $I_0 = \frac{U_0}{z_{B1}}$	 $2U_0$ I_0	$u_1 = \frac{2U_0}{z_{B1} + z_{B2}} \times$ $\times (z_{B2} + z_{B1} e^{pt});$ $u_2 = \frac{2U_0 z_{B2}}{z_{B1} + z_{B2}} (1 - e^{pt});$ $i_1 = i_2 =$ $= \frac{2I_0 z_{B1}}{z_{B1} + z_{B2}} (1 - e^{pt});$ $p = - \frac{z_{B1} + z_{B2}}{L}$

Продолжение табл. 4-9

Схема соединения линий	Распределение напряжений и токов	Закон изменения напряжений и токов в месте соединения линий
		$u_1 = u_2 = \frac{2U_0 z_{B2}}{z_{B1} + z_{B2}} e^{pt};$ $i_1 = 2I_0 \left(1 - \frac{z_{B2}}{z_{B1} + z_{B2}} e^{pt} \right);$ $i_2 = \frac{2I_0 z_{B1}}{z_{B1} + z_{B2}} e^{pt};$ $\rho = -r_{\text{ЭР}}/L;$ $r_{\text{ЭР}} = \frac{z_{B1} z_{B2}}{z_{B1} + z_{B2}}$
		$u_1 = 2U_0 - \frac{2U_0 z_{B1}}{z_{B1} + z_{B2}} e^{pt};$ $u_2 = \frac{2U_0 z_{B2}}{z_{B1} + z_{B2}} e^{pt};$ $i_1 = i_2 = \frac{2I_0 z_{B1}}{z_{B1} + z_{B2}} e^{pt};$ $\rho = -1/C(z_{B1} + z_{B2})$
		$u_1 = u_2 =$ $= \frac{2U_0 z_{B2}}{z_{B1} + z_{B2}} (1 - e^{pt});$ $i_1 = \frac{2I_0}{z_{B1} + z_{B2}} \times$ $\times (z_{B1} + z_{B2} e^{pt});$ $i_2 = \frac{2I_0 z_{B1}}{z_{B1} + z_{B2}} (1 - e^{pt});$ $\rho = -1/r_{\text{ЭР}} C;$ $r_{\text{ЭР}} = \frac{z_{B1} z_{B2}}{z_{B1} + z_{B2}}$

Примечания: 1. Время t отсчитывается от момента, когда падающая волна (U_0 , I_0) достигает места соединения линий. Предполагается, что за время t следующие отражения волн еще не наступили.

2. Чтобы получить закон распределения тока и напряжения вдоль линий, когда отраженная волна прошла путь x_1 , а проходящая волна — путь x_2 , нужно в выражениях для u_1 и i_1 заменить t на $t - x_1/c_1$ и в выражениях для u_2 и i_2 заменить t на $t - x_2/c_2$, где c_1 и c_2 — скорости движения волн в первой и второй линиях.

элементы с сосредоточенными параметрами, составляющие произвольный пассивный четырехполюсник. На рис. 4-44, а: $u_{\text{пад}}$ — напряжение падающей волны; z_{B1} и z_{B2} — волновые сопротивления первой и второй линий. Если отражение происходит от конца линии (вторая линия отсутствует), то в схеме замещения отсутствует сопротивление z_{B2} и четырехполюсник следует рассматривать относительно его первичных выводов как двухполюсник. По схеме замещения определяются напряжения и токи на выводах I — I'

и 2—2' четырехполюсника: u_1 , i_1 , u_2 , i_2 . Напряжение и ток отраженной волны: $u_{\text{отр}} = u_1 - u_{\text{пад}}$; $i_{\text{отр}} = i_{\text{пад}} - i_1$, где $i_{\text{пад}} = u_{\text{пад}}/z_{B1}$; $i_{\text{отр}} = u_{\text{отр}}/z_{B1}$.

Напряжение и ток проходящей волны:

$$u_{\text{прох}} = u_2; i_{\text{прох}} = i_2 = u_{\text{прох}}/z_{B2}.$$

Отсчет времени ($t=0$) можно начать с момента, когда волна $u_{\text{пад}}$, движущаяся со скоростью c , достигнет места соединения линий (или конца линии).

Пример. Волна с прямоугольным фронтом $U_{\text{пад}} = U_0 = 100$ В движется по воздушной линии с $z_{B1} = 400$ Ом (рис. 4-45, а). В месте соединения линии с кабелем ($z_{B2} = 50$ Ом; $\epsilon_r = 4$; $\mu_r = 1$) включены конденсатор $C = 50$ мкФ и резистор $r = 50$ Ом. Найти $u_{\text{отр}}$, $i_{\text{отр}}$, $u_{\text{прох}}$, $i_{\text{прох}}$. Построить график распределения напряжений и тока вдоль обеих линий, когда отраженная от места соединения волна пройдет x км. в направлении к началу воздушной линии.

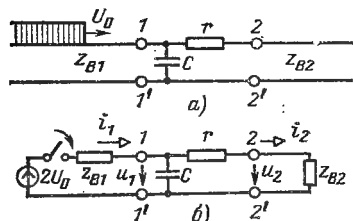


Рис. 4-45.

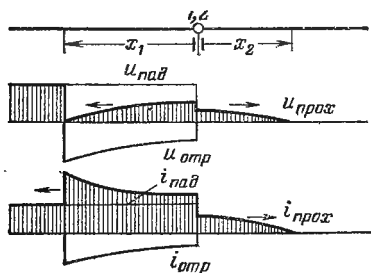


Рис. 4-46.

Напряжения и токи в схеме замещения (рис. 4-45, б) можно найти, например, классическим методом:

$$u_2 = u_{2y} + u_{2св}; \quad u_{2y} = \frac{2U_0 z_{B2}}{z_{B1} + r + z_{B2}} = 20 \text{ В};$$

$$u_{2св} = Ae^{p_1 t},$$

$$\text{где } p_1 = -1/r_{\text{ЭК}} C = -250 \text{ с}^{-1};$$

$$r_{\text{ЭК}} = \frac{(r + z_{B2}) z_{B1}}{r + z_{B2} + z_{B1}} = 80 \text{ Ом, т. е.}$$

$$u_2 = 20 + Ae^{-250t} \text{ В.}$$

При $t=0$ и $u_1=0$, следовательно, $u_2=0$ и $0 = -20 + A$, откуда $A = -20$, т. е.

$$u_2 = 20 - 20e^{-250t} \text{ В.}$$

Далее

$$i_2 = u_2/z_{B2} = 0,4 - 0,4e^{-250t} \text{ А};$$

$$u_1 = (r + z_{B2}) i_2 = 40 - 40e^{-250t} \text{ В};$$

$$i_1 = (2U_0 - u_1)/z_{B1} = 0,4 + 0,1e^{-250t} \text{ А};$$

$$u_{\text{отр}} = u_1 - u_{\text{пад}} = -60 - 40e^{-250t} \text{ В};$$

$$i_{\text{отр}} = u_{\text{отр}}/z_{B1} = -0,15 - 0,1e^{-250t} \text{ А};$$

$$u_{\text{прох}} = u_2; \quad i_{\text{прох}} = i_2.$$

Чтобы построить распределение напряжений и токов отраженной и проходящей волн вдоль

линий (рис. 4-46), нужно в выражениях для $u_{\text{отр}}$ и u_2 , i_2 заменить t на $t-x/c$, где x — путь, пройденный волной за время t (по 1-й линии со скоростью c_1 пройден путь x_1 , по 2-й линии со скоростью c_2 — путь x_2).

Графики напряжений и токов в различных случаях отражения даны в табл. 4-8 и 4-9.

При повторных отражениях необходимо применять принцип наложения.

Если переходный процесс возникает в результате не включения линии, а другой коммутации, например подключения приемника к линии, находящейся под напряжением, расчет по схеме замещения должен быть сведен к нулевым начальным условиям, как и в цепях с сосредоточенными параметрами (с. 149).

Литература [4-1—4-6, 4-8, 4-15, 4-40—4-46].

4-6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Закон Кулона

Сила взаимодействия между двумя точечными неподвижными зарядами q_1 и q_2 (точнее, сила, испытываемая вторым зарядом) в однородной среде с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r

$$F_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0 R_{12}^2} R^0,$$

где R_{12} — расстояние между зарядами; $R^0 = R_{12}/R_{12}$ — единичный вектор, направленный от первого заряда ко второму.

Коэффициент пропорциональности ϵ_0 — электрическая постоянная — здесь и в дальнейшем зависит от выбора системы единиц и формы записи основных уравнений. В Международной системе СИ и в абсолютной практической рационализованной системе единиц МКСА $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, в нерационализованной системе СГСЭ и симметричной Гауссовой $\epsilon_0 = 1$. Здесь и всюду далее предполагается, что среда имеет одинаковые свойства во всех направлениях (изотропна) и линейна.

Одноименные заряды отталкиваются, разноименные притягиваются.

Напряженность поля. Потенциал

Напряженность поля определяет силу, действующую в этом поле на заряженную частицу с положительным зарядом q :

$$E = F/q.$$

По теореме Гаусса для электростатического поля поток вектора E через замкнутую поверхность S равен алгебраической сумме свободных Q и связанных $Q_{\text{связ}}$ зарядов, охватываемых этой поверхностью:

$$\oint \epsilon_0 E dS = \Sigma Q + \Sigma Q_{\text{связ}}.$$

В однородной среде с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r

$$\oint \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} d\mathbf{S} = \Sigma Q.$$

Если в объеме V , ограниченном поверхностью S , распределен объемный заряд с плотностью ρ , поверхностный заряд (на электродах) с плотностью σ , линейный заряд с плотностью τ (например, на проводах линии), то

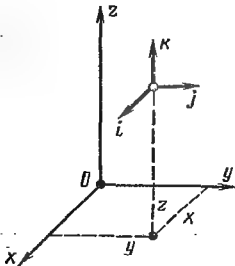
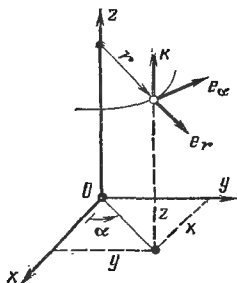
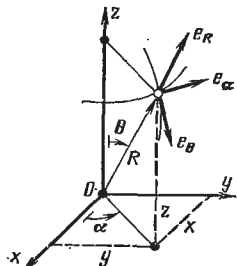
$$\oint \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} d\mathbf{S} = \int \rho dV + \int \sigma dS + \int \tau dl.$$

Напряженность электростатического поля (поля неподвижных зарядов) или поля постоянных токов в проводящей среде (вне источников энергии) может быть представлена как градиент скалярной функции φ -потенциала.

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi = -\nabla \varphi.$$

Таблица 4-10

Декартовы, цилиндрические и сферические координаты. Операции векторного анализа

Декартовы x, y, z	Цилиндрические r, α, z	Сферические R, θ, α
 $d\mathbf{l} = i dx + j dy + k dz$	 $x = r \cos \alpha; \quad y = r \sin \alpha; \quad z = z$ Элемент длины $d\mathbf{l} = e_r dr + e_\alpha r d\alpha + e_z dz$ $e_z = k$	 $x = R \sin \theta \cdot \cos \alpha;$ $y = R \sin \theta \cdot \sin \alpha; \quad z = R \cos \theta$ $d\mathbf{l} = e_R dR + e_\theta R d\theta + e_\alpha R \sin \theta d\alpha$

$$\begin{aligned} \text{grad } \varphi = \nabla \varphi &= i \frac{\partial \varphi}{\partial x} + j \frac{\partial \varphi}{\partial y} + k \frac{\partial \varphi}{\partial z} = e_r \frac{\partial \varphi}{\partial r} + e_\alpha \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} + e_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \\ &= e_R \frac{\partial \varphi}{\partial R} + e_\theta \frac{1}{R} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + e_\alpha \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{div } \mathbf{F} = \nabla \mathbf{F} &= \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial F_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = \\ &= \frac{1}{R^2} \frac{\partial (R^2 F_R)}{\partial R} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial (F_\theta \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial F_\alpha}{\partial \alpha}; \end{aligned}$$

$$\text{rot } \mathbf{F} = \nabla \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{e_r}{r} & e_\alpha & \frac{e_z}{r} \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \alpha} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_r & r F_\alpha & F_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{e_R}{R^2 \sin \theta} & \frac{e_\theta}{R \sin \theta} & \frac{e_\alpha}{R} \\ \frac{\partial}{\partial R} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial \alpha} \\ F_R & R F_\theta & (R \sin \theta) F_\alpha \end{vmatrix};$$

$$\begin{aligned} \text{div grad } \varphi = \nabla^2 \varphi &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \\ &= \frac{1}{R} \frac{\partial^2 (R \varphi)}{\partial R^2} + \frac{1}{R^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{R^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2}; \end{aligned}$$

$$\text{div rot } \mathbf{F} = \nabla (\nabla \times \mathbf{F}) = 0; \quad \text{rot grad } \varphi = \nabla \times \nabla \varphi = 0;$$

$$\text{div } (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \nabla (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \text{ rot } \mathbf{A} - \mathbf{A} \text{ rot } \mathbf{B};$$

$$\text{rot rot } \mathbf{F} = \nabla \times (\nabla \times \mathbf{F}) = \text{grad div } \mathbf{F} - \nabla^2 \mathbf{F};$$

$$\oint \mathbf{F} d\mathbf{S} = \int \text{div } \mathbf{F} dV; \quad \oint \mathbf{F} d\mathbf{l} = \int \text{rot } \mathbf{F} d\mathbf{S}.$$

Разность потенциалов между точками M_1 и M_2 электростатического поля или поля постоянных токов в проводящей среде не зависит от пути l :

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_{M_1}^{M_2} E \, dl \quad \text{и} \quad -d\varphi = E \, dl;$$

$$\oint E \, dl = 0 \quad \text{и} \quad \text{rot } E = 0$$

(потенциальное поле).

Уравнение электрической (силовой) линии l поля:

$$E \times dl = 0.$$

Уравнение эквипотенциали:

$$E \, dl = 0.$$

Например, для точечного заряда q или заряженной сферы с суммарным зарядом q поле вне сферы:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0 R^2} R^0; \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0 R},$$

где R — расстояние от точечного заряда или центра сферы до точки наблюдения; $R^0 = R/R$ — единичный вектор, направленный из центра в точку наблюдения; потенциал φ принят равным нулю в бесконечно удаленной точке.

Для диполя с зарядами $\pm q$ и плечом l (вектор направлен от $-q$ к $+q$) в сферической системе координат (табл. 4-10) с началом в центре диполя и с отсчетом угла θ от оси, направленной вдоль плеча l :

$$E_R = \frac{2ql \cos \theta}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0 R^3}; \quad E_\theta = \frac{ql \sin \theta}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0 R^3};$$

$$E_\alpha = 0; \quad \varphi = ql \cos \theta / 4\pi\epsilon_r \epsilon_0 R^2,$$

где потенциал φ принят равным нулю в бесконечно удаленной точке.

Для одиночного прямолинейного проводника — достаточно длинного, чтобы можно было пренебречь влиянием краев, заряженного с линейной плотностью τ (на единицу длины) — в цилиндрической системе координат (см. табл. 4-10), ось z которой совпадает с осью провода, поле вне провода

$$E = E_r = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r \epsilon_0 r}; \quad \varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r \epsilon_0} \ln \frac{C}{r},$$

где C — постоянная, зависящая от выбора начала отсчета потенциала.

Для двухпроводной линии с зарядами $\pm \tau$ (на единицу длины), расстоянием между осями проводов d и радиусом проводов $r_0 \ll d$ потенциал вне проводов

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r \epsilon_0} \ln \frac{r_-}{r_+},$$

где r_- и r_+ — соответственно расстояния до точки наблюдения от осей отрицательно и положительно заряженных проводов; потенциал φ принят равным нулю в центре между проводами.

Для коаксиального кабеля с зарядом жилы на единицу длины $+\tau$ и оболочки $-\tau$, напряжением между жилой и оболочкой U , радиусом жилы r_1 и внутренним радиусом оболочки r_2 в цилиндрической системе координат (см. табл. 4-10) с осью z , совпадающей с осью кабеля, поле в диэлектрике

$$E = E_r = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r \epsilon_0 r} = \frac{U}{r \ln(r_2/r_1)};$$

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r \epsilon_0} \ln \frac{C}{r},$$

где C — постоянная, зависящая от выбора начала отсчета потенциала.

Поляризованность, смещение

Вектор поляризованности равен объемной плотности электрических моментов диполей (момент в единице объема):

$$P = \lim_{V \rightarrow 0} (\Sigma p/V),$$

где $p = ql$ — электрический момент диполя поляризованной среды; q — заряд диполя; l — плечо диполя (его направление от отрицательного заряда к положительному).

В случае одинаковых моментов

$$P = pn,$$

где n — число диполей в единице объема.

Связанный (в диполях) заряд внутри замкнутой поверхности

$$\Sigma Q_{\text{связ}} = - \oint P \, dS.$$

Объемная плотность связанного заряда

$$\rho_{\text{связ}} = - \text{div } P.$$

Вектор электрического смещения D определяется как сумма двух векторов:

$$D = \epsilon_0 E + P.$$

По теореме Гаусса

$$\oint D \, dS = \Sigma Q,$$

где Q — свободные заряды; в частности,

$$Q = \int \rho \, dV + \int \sigma \, dS + \int \tau \, dl.$$

Объемная плотность свободного заряда

$$\rho = \text{div } D.$$

В линейной среде

$$P = \chi_r \epsilon_0 E = \chi_a E \quad \text{и} \quad D = (1 + \chi_r) \epsilon_0 E = \epsilon_r \epsilon_0 E = \epsilon_a E,$$

где $\epsilon_r = 1 + \chi_r$ — относительная диэлектрическая проницаемость; χ_r — относительная диэлектрическая восприимчивость; χ_a — абсолютная диэлектрическая восприимчивость; ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость.

В нерационализованных системах ГСЭ и симметричной Гауссовой ($\epsilon_0=1$)

$$D = E + 4\pi P = (1 + 4\pi\epsilon_r)E = \epsilon_r E,$$

где $\epsilon_r = 1 + 4\pi\epsilon_0$ и ϵ_0 — диэлектрическая восприимчивость, которая в 4π раз меньше ϵ_r . При пользовании таблицами необходимо обратить внимание на то, какое из значений восприимчивости имеется в виду.

Ток, плотность тока

В проводящей среде при постоянном поле с напряженностью E плотность тока (закон Ома в дифференциальной форме)

$$J = \gamma E,$$

где γ — удельная проводимость среды.

Ток через поверхность S

$$I = \int J dS.$$

По закону сохранения заряда

$$\oint J dS = 0 \text{ и } \operatorname{div} J = 0.$$

По закону Джоуля — Ленца активная мощность в единице объема

$$p = JE = \gamma E^2 = J^2/\gamma.$$

Уравнения Лапласа и Пуассона.

Граничные условия

Для каждой точки потенциального поля, например электростатического, справедливо уравнение Пуассона

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon_r \epsilon_0,$$

где φ — потенциал; ρ — свободный объемный заряд в рассматриваемой точке.

Если в рассматриваемой точке плотность свободных объемных зарядов равна нулю, то

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

— уравнение Лапласа.

На границе раздела двух диэлектриков (1 и 2)

$$E_{2t} = E_{1t} \text{ или } \varphi_2 = \varphi_1; \quad D_{2n} = D_{1n};$$

$$P_{2n} - P_{1n} = -\sigma_{\text{связ}},$$

где принято, что нормаль n направлена из первой среды во вторую.

На границе раздела проводника (1) и диэлектрика (2) в электростатическом поле (поля в проводнике нет)

$$E_{2t} = E_{1t} = 0 \text{ или } \varphi_2 = \varphi_1; \quad D_{2n} = \sigma;$$

$$E_{1n} = 0; \quad P_{2n} = -\sigma_{\text{связ}}; \quad P_{1n} = 0.$$

На границе раздела проводника (1) и диэлектрика (2) в поле постоянного тока

$$E_{2t} = E_{1t} = J_{1t}/\gamma \text{ или } \varphi_2 = \varphi_1;$$

$$J_{2t} = 0; \quad J_{2n} = J_{1n} = 0; \quad D_{2n} = \sigma;$$

$$E_{1n} = 0; \quad P_{2n} = -\sigma_{\text{связ}}; \quad P_{1n} = 0.$$

На границе раздела двух проводников (1 и 2) в поле постоянного тока

$$E_{2t} = E_{1t} \text{ или } \varphi_2 = \varphi_1; \quad J_{2n} = J_{1n}.$$

Здесь D_n , E_n , P_n , J_n — нормальные составляющие векторов; E_t , J_t — тангенциальные составляющие векторов; σ и $\sigma_{\text{связ}}$ — поверхностные плотности свободного и связанного зарядов. Нормаль к границе раздела направлена из среды 1 в среду 2.

Распределение потенциала

в системе проводящих заряженных тел

Потенциал любого из n тел φ_k линейно зависит от зарядов Q_i каждого из тел:

$$\varphi_1 = \alpha_{11} Q_1 + \alpha_{12} Q_2 + \dots + \alpha_{1n} Q_n;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\varphi_n = \alpha_{n1} Q_1 + \alpha_{n2} Q_2 + \dots + \alpha_{nn} Q_n,$$

где α_{hi} — потенциальные коэффициенты; $\alpha_{hi} = \alpha_{ih}$ при $k \neq i$.

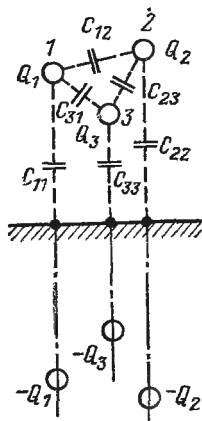


Рис. 4-47.

Система уравнений может быть решена относительно зарядов:

$$Q_1 = \beta_{11} \varphi_1 + \beta_{12} \varphi_2 + \dots + \beta_{1n} \varphi_n;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$Q_n = \beta_{n1} \varphi_1 + \beta_{n2} \varphi_2 + \dots + \beta_{nn} \varphi_n,$$

где β_{ih} — емкостные коэффициенты; $\beta_{ih} = \beta_{hi}$ при $i \neq k$.

Пример (рис. 4-47). Трехпроводная линия над землей. Влияние земли заменяется зеркальным отображением:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{2h_{ii}}{r}; \quad \alpha_{ki} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{D_{ki}}{d_{ki}},$$

где l — длина линии; h_{ii} — высота подвеса i -го провода; r — радиус провода; D_{ki} — расстояние между центром k -го провода и центром зеркального отображения i -го провода; d_{ki} — расстояние между центрами k -го и i -го проводов; при вычислении α предполагается $r \ll d$ и $r \ll h$;

$$\beta_{11} = \frac{\alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{23}^2}{\Delta}; \quad \beta_{12} = \beta_{21} = \frac{\alpha_{23}\alpha_{31} - \alpha_{21}\alpha_{33}}{\Delta};$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}.$$

Остальные коэффициенты β можно записать, применив круговую замену индексов, причем $\beta_{ii} > 0$ и $\beta_{ki} < 0$.

Емкость

В случае двух проводников, несущих равные и противоположные по знаку заряды $Q_1 = -Q_2 = Q$:

$$\varphi_1 = (\alpha_{11} - \alpha_{12}) Q; \quad \varphi_2 = (\alpha_{21} - \alpha_{22}) Q \text{ и}$$

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = (\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12}) Q.$$

Емкость между двумя проводниками

$$C = Q/U_{12}.$$

Если второй проводник удален в бесконечность и $\varphi_2 = 0$, то емкость уединенного проводника

$$C = Q/\varphi_1.$$

Частичные емкости

Линейная зависимость зарядов проводников от потенциалов может быть записана и в виде

$$Q_i = C_{i1}\varphi_1 + C_{i2}(\varphi_i - \varphi_2) + \dots + C_{in}(\varphi_1 - \varphi_n);$$

$$Q_n = C_{nn}\varphi_n + C_{n1}(\varphi_n - \varphi_1) + \dots + C_{n,n-1}(\varphi_n - \varphi_{n-1}),$$

где частичные емкости (см. рис. 4-47)

$$C_{ii} = \beta_{i1} + \beta_{i2} + \dots + \beta_{ii} + \dots + \beta_{in};$$

$$C_{ki} = C_{ik} = -\beta_{ik}.$$

Моделирование

Аналогия уравнений электростатического поля при $\rho = 0$ и постоянного поля в проводящей среде вне источников энергии позволяет моделировать электростатические поля, подчиняющиеся уравнению Лапласа, полями в проводящей среде, если проводимость среды γ много меньше проводимости материала электродов (см. также «Метод электростатической аналогии»).

Энергия электростатического поля. Силы

Энергия

$$W = \frac{1}{2} \sum_k \varphi_k Q_k + \frac{1}{2} \int \rho \varphi dV,$$

где φ_k и Q_k — потенциалы и заряды электродов (проводников); ρ — объемная плотность свободного заряда между электродами.

Энергия конденсатора

$$W = CU^2/2 = QU/2 = Q^2/2C.$$

Объемная плотность энергии поля (для которого $D = \epsilon_r \epsilon_0 E$)

$$w = DE/2 = \epsilon_r \epsilon_0 E^2/2 = D^2/2\epsilon_r \epsilon_0.$$

Составляющая механической силы по координате g (стремящаяся изменить данную координату g проводника)

$$F = -(\partial W / \partial g)_{Q=\text{const}}; \quad F = (\partial W / \partial g)_{\varphi=\text{const}}.$$

Первая из формул применяется, если при изменении энергии поля остаются постоянными заряды всех проводников (например, когда все проводники изолированы и отсоединены от источников питания). Вторая формула применяется, если остаются постоянными потенциалы всех проводников (например, потенциалы всех проводников заданы присоединенным источником питания).

Литература [4-1, 4-2, 4-4—4-6, 4-47—4-50].

4-7. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитная индукция и магнитный поток

Сила, испытываемая в магнитном поле движущимся зарядом q (сила Лоренца) или элементом проводника dl с током i (сила Ампера), определяется вектором магнитной индукции B :

$$F = qc \times B \text{ и } dF = i dl \times B,$$

где c — скорость движения заряда.

Составляющая магнитной индукции, создаваемой элементом тока $I dl$ на расстоянии r от элемента тока в однородной среде с относительной магнитной проницаемостью μ_r , по закону Био — Савара

$$dB = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} \frac{I dl \times r^0}{r^2},$$

где $r^0 = r/r$ — единичный вектор, направленный от элемента тока в данную точку.

Коэффициент пропорциональности μ_0 — магнитная постоянная — здесь и в дальнейшем зависит от выбора системы единиц и формы записи уравнений. В системе СИ и рационализованной системе МКСА постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ Гн/м, в нерационализованных системах СГСМ и симметричной Гауссовой $\mu_0 = 1$.

Магнитная индукция, создаваемая контуром с током I ,

$$B = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} I \oint \frac{dl \times r^0}{r^2}.$$

Например, для круглого витка радиусом a с током I индукция на оси

$$B = B_z = \frac{\mu_r \mu_0 I}{2} \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}},$$

где z — расстояние от центра витка.

Для прямолинейного провода радиусом r_0 с постоянной плотностью тока J в цилиндрической системе координат с осью z , совпадающей с осью провода, индукция внутри (1) и вне (2) провода

$$B_1 = B_{1\alpha} = \frac{\mu_r \mu_0 J r}{2};$$

$$B_2 = B_{2\alpha} = \frac{\mu_{r2} \mu_0 J_0^2}{2r},$$

где r — расстояние от оси провода.

Магнитный поток через поверхность S

$$\Phi = \int B dS.$$

Для замкнутой поверхности

$$\oint B dS = 0, \text{ т. е. } \operatorname{div} B = 0.$$

Намагниченность.

Напряженность магнитного поля

Вектор намагниченности

$$M = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Sigma m}{V}; \quad \operatorname{rot} M = J_{\text{связ}},$$

где Σm — сумма магнитных моментов в элементарном объеме V ; $J_{\text{связ}}$ — плотность токов, обуславливающих магнитный момент вещества (магнетика) и его намагниченность.

Вектор напряженности

$$H = B/\mu_0 - M.$$

В неферромагнетике $M = \kappa H$;

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (1 + \kappa) H = \mu_r \mu_0 H = \mu_a H,$$

где $\mu_r = 1 + \kappa$ — относительная магнитная проницаемость; κ — относительная магнитная восприимчивость; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость.

В нерационализированных системах СГСМ и симметричной Гауссовой ($\mu_0 = 1$)

$$B = H + 4\pi M = (1 + 4\pi\kappa) H = \mu_r H,$$

где $\mu_r = 1 + 4\pi\kappa$ (см. замечание о диэлектрической восприимчивости).

Закон полного тока

$$\oint B dl = \mu_0 \int (J + J_{\text{связ}}) dS;$$

$$\operatorname{rot} B = \mu_0 (J + J_{\text{связ}}),$$

где J — плотность тока проводимости; l — контур, ограничивающий поверхность S .

Закон полного тока, выраженный через напряженность H , позволяет не учитывать в явной форме связанных токов:

$$\oint H dl = \int J dS \quad \text{и} \quad \operatorname{rot} H = J.$$

Для линейных токов

$$\oint H dl = \Sigma I,$$

где ΣI — алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром l .

Потенциалы магнитного поля.

Граничные условия

В магнитном поле, для которого $\oint H dl = 0$ и $\operatorname{rot} H = 0$ (потенциальное поле),

по аналогии с электростатическим полем можно принять

$$H = -\operatorname{grad} \varphi_M = -\nabla \varphi_M.$$

Например, скалярный магнитный потенциал φ_M можно применить к расчету искажений заданного магнитного поля при внесении в него ферромагнитного тела.

Если в магнитном поле $\operatorname{rot} H = 0$, но $\oint H dl \neq 0$ (соленоидальное поле), то можно ввести скалярный потенциал $H = -\operatorname{grad} \varphi_M$, но разность потенциалов неоднозначна.

Пример. Для коаксиального волновода (кабеля) (рис. 4-48) в области $r_1 < r < r_2$ плотность

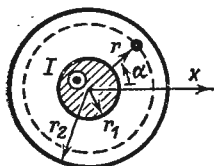


Рис. 4-48.

тока равна нулю, т. е. $\operatorname{rot} H = 0$. Но значение $\oint H dl$ зависит от выбранного замкнутого контура. Если контур охватывает жилу n раз, то $\oint H dl = nI$. Поэтому разность потенциалов неоднозначна. Чтобы получить однозначность, надо ввести перегородку, устраняющую пути, которые охватывают токи. Для волновода, введя перегородку $\alpha = 0$ и выбрав $\varphi_M = 0$ при $\alpha = 0$, получим $\varphi_M = -I\alpha/2\pi$. Неоднозначность потенциала не скажется на значении градиента потенциала:

$$H = H_\alpha = I/2\pi r.$$

В области, где $\operatorname{rot} H \neq 0$ (вихревое поле), скалярный потенциал не может быть введен.

В любой области можно ввести векторный магнитный потенциал A :

$$\operatorname{rot} A = B \quad \text{и} \quad \oint A dl = \Phi.$$

Величина $\operatorname{div} A$ не влияет на индукцию B и выбирается произвольно, но так, чтобы уравнения, содержащие A , упростились. Так, для однородной среды при $\operatorname{div} A = 0$ векторный потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\nabla^2 A = -\mu_r \mu_0 J$$

и для точек поля, где отсутствует плотность тока проводимости, уравнению Лапласа

$$\nabla^2 A = 0.$$

Пример. Для двухпроводной линии с током I вне проводов векторный потенциал

$$A = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{r_-}{r_+},$$

где r_- и r_+ — соответственно расстояния до точки наблюдения от 1-го и 2-го проводов; потенциал A принят равным нулю в центре между проводами.

На границе раздела двух сред (1 и 2) $B_{2n} = B_{1n}$ или $A_{2t} = A_{1t}$ и $H_{2t} = H_{1t}$, где B_n — нормальная составляющая вектора индукции; A_t и H_t — тангенциальные составляющие векторного потенциала и вектора напряженности.

Энергия. Электродинамические силы

Энергия системы контуров (катушек) с токами

$$W = \frac{1}{2} \sum i_k \Psi_k,$$

где Ψ_k — потокосцепление k -го контура; i_k — ток k -го контура.

Для двух контуров

$$W = L_1 i_1^2/2 + L_2 i_2^2/2 \pm M i_1 i_2,$$

+ M — при «согласном» включении, — M — при «встречном» включении.

Объемная плотность энергии поля (если $B = \mu_r \mu_0 H$)

$$w = BH/2 = \mu_r \mu_0 H^2/2 = B^2/2\mu_r \mu_0.$$

Сила, действующая на провод длиной l с током I (рис. 4-49),

$$F = Il \times B.$$

Сила взаимодействия двух достаточно длинных параллельных проводов ($l_1 = l_2 = l$).

$$F = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi a} I_1 I_2 l,$$

где a — расстояние между проводами.

Два провода притягиваются, когда токи в них имеют одинаковые направления, и отталкиваются, когда направления токов противоположны.

Сила, стремящаяся изменить данную координату g системы контуров,

$$F = -(\partial W / \partial g)_{\Psi = \text{const}}; \quad F = (\partial W / \partial g)_{i = \text{const}}$$

(см. примечание к вычислению силы в электростатическом поле).

Электромагнитная индукция (наведение ЭДС)

Если провод движется в магнитном поле B со скоростью v , то в каждом элементе dl провода ЭДС

$$de = B (dl \times v).$$

Если провод l движется в однородном магнитном поле перпендикулярно векторам B и l , то $e = Blv$.

Для замкнутого контура

$$e = \oint E dl = \oint (v \times B) dl = -d\Phi/dt.$$

Такая же ЭДС индуцируется в неподвижном контуре l при изменении магнитного потока, пронизывающего контур. Если контур состоит из w витков (катушка), каждый из которых пронизывается одним и тем же потоком Φ , то наводимая ЭДС в w раз больше.

Если не все витки охватываются одним и тем же потоком, то $e = -d\Psi/dt$, причем потокосцепление

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_k + \dots + \Phi_w,$$

где Φ_k — поток, пронизывающий k -й виток.

Если одновременно изменяется магнитный поток и перемещается контур, то

$$e = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} - \frac{\partial \Psi}{\partial t}.$$

Самоиндукция и взаимная индукция

В простейшем случае одного контура с током в неферромагнитной среде магнитный поток, сцепляющийся с этим контуром, определяется только током в этом контуре:

$$\Psi_L = Li,$$

где L — индуктивность контура, которая зависит от размеров и формы контура, а также магнитных свойств окружающей среды. При изменении потокосцепления Ψ_L в контуре возникает ЭДС самоиндукции

$$e_L = -d\Psi_L/dt = -L di/dt.$$

В случае двух контуров с изменяющимися токами в каждом из них наводится кроме ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции. Например, потокосцепление со вторым контуром

$$\Psi_2 = \Psi_{2L} \pm \Psi_{2M} = L_2 i_2 \pm M_{21} i_1,$$

где M_{21} — взаимная индуктивность между вторым и первым контурами:

$$M_{21} = M_{12} = M.$$

Кроме ЭДС $e_{2L} = -d\Psi_{2L}/dt$ во втором контуре возникает ЭДС взаимной индукции

$$e_{2M} = -d\Psi_{2M}/dt = -M di_1/dt.$$

Зависимость между M , L_1 и L_2 определяется коэффициентом связи

$$k = M/\sqrt{L_1 L_2}, \text{ причем } k \leq 1.$$

Закон Ленца: ЭДС, наводимая в контуре изменяющимся магнитным потоком, всегда стремится вызвать ток, направленный так, чтобы воспрепятствовать изменению магнитного потока.

Литература [4-1, 4-2, 4-4 — 4-6, 4-47 — 4-50].

4-8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в неподвижной среде

Вихри поля:

$$\text{rot } H = \gamma E + \partial D / \partial t = J_{\text{полн}}$$

(закон полного тока);

$$\text{rot } E = -\partial B / \partial t$$

(закон электромагнитной индукции).

Здесь $\gamma E = J$ — плотность тока проводимости; $\partial D / \partial t = J_{\text{см}}$ — плотность тока смещения; γ — удельная проводимость среды; $J_{\text{полн}}$ — плотность полного тока.

Истоки поля:

$$\operatorname{div} B = 0 \text{ и } \operatorname{div} D = \rho,$$

причем $B = \mu_0 (H + M)$; $D = \epsilon_0 E + P$

и по закону сохранения заряда

$$\operatorname{div} J = -\partial \rho / \partial t.$$

Для линейной изотропной среды

$$B = \mu_r \mu_0 H; \quad D = \epsilon_r \epsilon_0 E;$$

$$\operatorname{rot} H = \gamma E + \epsilon_r \epsilon_0 \partial E / \partial t;$$

$$\operatorname{rot} E = -\mu_r \mu_0 \partial H / \partial t.$$

Граничные условия

На границе двух сред (1 и 2)

$$B_{2n} = B_{1n}; \quad H_{2t} = H_{1t}; \quad E_{2t} = E_{1t};$$

$$D_{2n} - D_{1n} = \sigma; \quad J_{2n \text{ полн}} = J_{1n \text{ полн}}.$$

Потенциалы

Скалярный (электрический) φ и векторный (магнитный) A потенциалы электромагнитного поля определяются уравнениями

$$\operatorname{rot} A = B \text{ и } -\operatorname{grad} \varphi = E + \partial A / \partial t.$$

Если выбрать уравнение связи

$$\operatorname{div} A = -\frac{1}{c^2} \partial \varphi / \partial t,$$

где $c = 1 / \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}$, то для векторного и скалярного потенциалов получаются волновые уравнения:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \nabla^2 A = \mu_r \mu_0 J;$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \nabla^2 \varphi = \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0}.$$

В этих уравнениях плотность тока J и заряд ρ связаны законом сохранения заряда, т. е. не могут задаваться независимо. После решения одного из уравнений при заданных граничных и начальных условиях вторая величина определяется из уравнения связи.

Магнитная индукция и напряженность электрического поля находятся после выполнения простых операций:

$$B = \operatorname{rot} A \text{ и } E = -\partial A / \partial t - \operatorname{grad} \varphi.$$

Уравнения Максвелла в комплексной форме

Когда электромагнитное поле изменяется синусоидально, уравнения Максвелла могут быть записаны в комплексной форме:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \gamma \dot{E} + j\omega \epsilon_r \epsilon_0 \dot{E};$$

$$\operatorname{rot} \dot{E} = -j\omega \mu_r \mu_0 \dot{H};$$

$$\operatorname{div} \dot{B} = 0; \quad \operatorname{div} \dot{D} = \dot{\rho}.$$

Определение потерь.

Теорема Умова — Пойнтинга

Потери в среде объемом V с удельной проводимостью γ по закону Джоуля—Ленца

$$P = \int JE \, dV = \int \gamma E^2 \, dV.$$

Во многих случаях потери проще вычисляются по теореме Умова—Пойнтинга

$$-\oint (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \, dS = P + (\partial W_e / \partial t + \partial W_m / \partial t),$$

где $\mathbf{E} \times \mathbf{H} = \vec{\Pi}$ — вектор Пойнтинга, равный численно потоку электромагнитной энергии, проходящей через единичную поверхность в 1 с (мощность). Левая часть равенства — поток мощности, входящий в объем V , ограниченный поверхностью S . Второе слагаемое правой части — изменение энергий электрического и магнитного полей в объеме V .

В комплексной форме

$$\vec{\Pi} = \frac{1}{2} \dot{E}_m \times \dot{H}_m^*,$$

где $\dot{E}_m$, $\dot{H}_m$ — комплексные амплитуды напряженностей, и

$$-\oint \vec{\Pi} \, dS = P +$$

$$+ j\omega \int \left(\frac{\mu_r \mu_0 H_m^2}{2} - \frac{\epsilon_r \epsilon_0 E_m^2}{2} \right) dV;$$

здесь P — действительная часть потока вектора Пойнтинга.

Литература [4-1, 4-2, 4-4 — 4-6, 4-47, 4-48, 4-51—4-53].

4-9. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ЕМКОСТЬ, ИНДУКТИВНОСТЬ

Сопротивление проводника

Сопротивление проводника, Ом, имеющего постоянное сечение S , м^2 , длиной l , м ,

$$r = l / \gamma S,$$

где γ — удельная проводимость, См/м .

Емкость конденсаторов и проводов

Емкость плоского конденсатора, Ф, состоящего из n пластин,

$$C = (n - 1) \epsilon_r \epsilon_0 S / d,$$

где S — площадь пластины, м^2 ; d — расстояние между пластинами, м ; ϵ_0 — в Ф/м.

Емкость цилиндрического конденсатора, Ф (коаксиального кабеля),

$$C = \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0 l}{\ln(R_2 / R_1)},$$

где l — длина конденсатора, м; R_1 — радиус внутреннего электрода (жилы); R_2 — радиус внешней обкладки (внутренний радиус оболочки); ϵ_0 — в Ф/м.

Емкость конденсатора с многослойным диэлектриком, Φ , плоского C_1 , цилиндрического C_2 :

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{\sum_{k=1}^n d_k / \epsilon_{rk}};$$

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{\epsilon_{rk}} \ln \frac{R_k}{R_{k-1}}},$$

где S — площадь пластины, м²; d_k — толщина k -го слоя диэлектрика, м; ϵ_{rk} — относительная диэлектрическая проницаемость k -го слоя; n — число слоев; l — длина конденсатора, м; R_0 — радиус внутреннего электрода; $R_1, R_2, \dots, R_{k-1}$ — радиусы граничных поверхностей между слоями; R_n — радиус внешней обкладки; ϵ_0 — в Ф/м; $k=1, 2, \dots, n$.

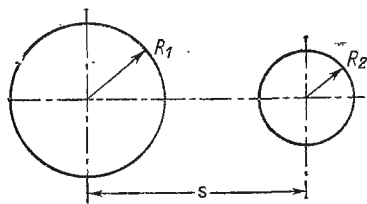


Рис. 4-50.

Емкость, Φ , двух параллельных цилиндров на единицу длины (рис. 4-50)

$$C_0 = 2\pi\epsilon_r \epsilon_0 / \ln \frac{k_1}{k_2},$$

где

$$k_1 = \frac{a + x_1 - R_1}{a + R_1 - x_1}; \quad k_2 = \frac{a + R_2 - x_2}{a + x_2 - R_2};$$

$$x_1 = \frac{s^2 + R_1^2 - R_2^2}{2s}; \quad x_2 = \frac{s^2 + R_2^2 - R_1^2}{2s};$$

$$a = \sqrt{x_1^2 - R_1^2} = \sqrt{x_2^2 - R_2^2}.$$

Емкость, Φ , прямолинейного провода конечной длины и круглого сечения (считая, что второй электрод в бесконечности)

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-9} l}{18 \left[\ln \frac{l}{r} - 0,307 - 0,1775 / \ln \frac{l}{r} - 0,552 \left(\ln \frac{l}{r} \right)^2 \right]}$$

с погрешностью менее 1% при $l/r > 10$; здесь l — длина провода, м; r — радиус поперечного сечения, м.

Если допустима меньшая точность, то можно принять

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-9} l}{18 [\ln (2l/r) - 1]}.$$

Примечание. Емкость уединенного проводника равна отношению заряда проводника к его потенциалу в предположении, что все другие проводники бесконечно удалены.

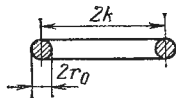


Рис. 4-51.

Емкость кольца, Φ (рис. 4-51; считая, что второй электрод в бесконечности),

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-9} \pi R}{9 \ln (8R/r_0)}$$

с погрешностью менее 2% при $R/r_0 > 10$; здесь R — радиус кольца, м; r_0 — радиус провода, м.

Метод электростатической аналогии

Сопротивление между электродами в проводящей среде рассчитывается методом электростатической аналогии по формулам емкости между теми же электродами, помещенными в диэлектрическую среду:

$$r = \epsilon_r \epsilon_0 / \gamma C,$$

где r — в Ом; C — емкость между электродами, Φ ; γ — удельная проводимость среды, См/м; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ϵ_0 — в Ф/м.

Пример. При известной емкости цилиндрического конденсатора сопротивление (в омах) между цилиндрическими коаксиальными электродами, помещенными в среду с проводимостью γ , рассчитывается по формуле

$$r = \frac{\ln (R_2/R_1)}{2\pi\gamma l}.$$

Индуктивность и взаимная индуктивность проводов

Индуктивность уединенного прямолинейного провода круглого сечения, Гн,

$$L = 2 \cdot 10^{-7} l \left(\ln \frac{2l}{r} - 0,75 \right),$$

где l — длина провода, м; r — радиус поперечного сечения, м.

Для коротких проводов L , Гн:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} l \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} + \frac{128r}{45\pi l} - \frac{r^2}{4l^2} \right).$$

Взаимная индуктивность, Гн, двух прямолинейных проводов одинаковой длины l (рис. 4-52)

$$M = 2\pi \cdot 10^{-7} lk,$$

где l — в м; k — коэффициент (рис. 4-53).

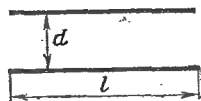


Рис. 4-52.

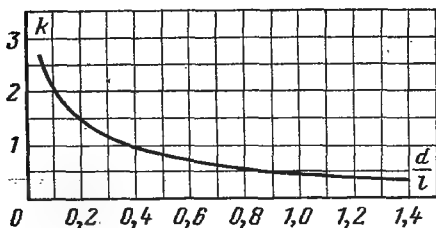


Рис. 4-53.

Индуктивность соленоида (бесконечно тонкой катушки) и однослойной катушки, Гн (рис. 4-57, а),

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \omega^2 k R,$$

где ω — число витков катушки; k — коэффициент (рис. 4-57, б); l и R — в м.

Если $l \geq 10R$, то с погрешностью не более 5%

$$L = \frac{2R\omega^2 \cdot 10^{-6}}{0,44 + l/2R}.$$

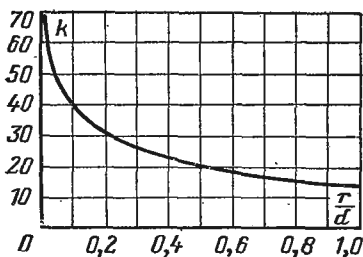


Рис. 4-56.

Индуктивность катушек

Индуктивность кольца (рис. 4-51), Гн, при $R \gg r_0$

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} R \left(\ln \frac{8R}{r_0} - 1,75 \right).$$

В общем случае

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} R \left[\ln \frac{8R}{r_0} - 1,75 + \frac{r_0^2}{8R^2} \left(\ln \frac{8R}{r_0} + \frac{1}{3} \right) \right],$$

где R и r_0 — в м; L — в Гн.

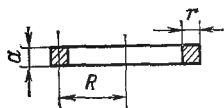


Рис. 4-54.

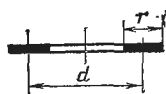


Рис. 4-55.

Индуктивность кругового кольца прямоугольного сечения (рис. 4-54), Гн,

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} R \left(\ln \frac{8R}{a+r} - 0,5 \right),$$

где R , a и r — в м.

Индуктивность плоской (дисковой) катушки, Гн (рис. 4-55),

$$L = 0,5 \cdot 10^{-7} \omega^2 k d,$$

где ω — число витков катушки; d — средний диаметр, м; k — коэффициент (рис. 4-56).

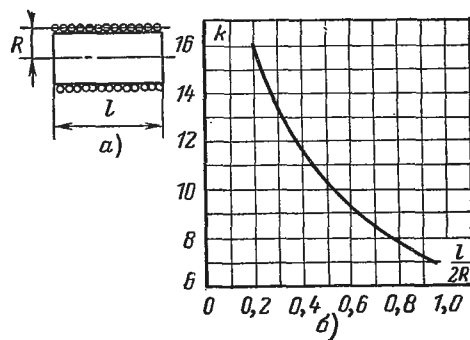


Рис. 4-57.

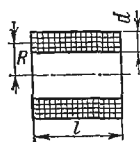


Рис. 4-58.

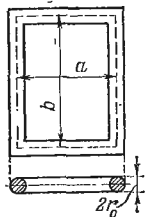


Рис. 4-59.

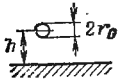
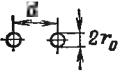
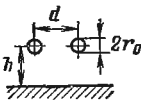
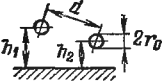
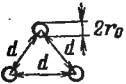
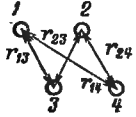
Индуктивность многослойной катушки, Гн (рис. 4-58),

$$L = \frac{0,32 \cdot 10^{-4} R^2 \omega^2}{6R + 9l + 10d},$$

где толщина намотки d , R и l — в м; ω — число витков катушки. Если в знаменателе слагаемые одного порядка, то ошибка, даваемая формулой, не более 1%.

Таблица 4-11

Емкость, индуктивность и взаимная индуктивность воздушных линий

Схема	C_0 , Ф/км	L_0 , Гн/км
	$\frac{10^{-6}}{18 \ln (2h/r_0)}$	$0,2 \left(\ln \frac{2h}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3}$
	$\frac{10^{-6}}{36 \ln (d/r_0)}$	$0,4 \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3}$
	$\frac{10^{-6}}{9 \ln \frac{(2h/r_0)^2}{1 + (2h/d)^2}}$	$0,4 \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3} - 2 \ln \left(1 + \frac{d^2}{4h^2} \right) 10^{-4}$
	$36 \ln \left[\frac{d}{r_0} \sqrt{\frac{4h_1h_2}{4h_1h_2 + d^2}} \right]$	$0,4 \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3}$ при $d \ll h_1$ и h_2
	Емкость на фазу $\frac{10^{-6}}{18 \ln (d/r_0)}$	Индуктивность на фазу $0,2 \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3}$
	1, 2 — первая линия; 3, 4 — вторая линия. Взаимная индуктивность, Гн/км, $0,2 \cdot 10^{-3} \ln \frac{r_{23} r_{14}}{r_{13} r_{24}}$	

При произвольном расположении проводов трехфазной линии с учетом земли емкость на фазу

$$\frac{10^{-6}}{18 \ln (2hd/r_0 D)}$$

где h , d и D — среднегеометрические значения высоты подвеса, расстояния между проводами и расстояния между одним проводом и зеркальным изображением другого:

$$h = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3}; \quad d = \sqrt[3]{d_{12} d_{23} d_{31}}; \quad D = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}.$$

Индуктивность на фазу при $d \ll h$

$$2 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right).$$

Индуктивность прямоугольной рамки, Гн (рис. 4-59),

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \left[a \ln \frac{2ab}{r_0(a+d)} + b \ln \frac{2ab}{r_0(b+d)} + 2d - 1,75(a+b) \right],$$

где $d = \sqrt{a^2 + b^2}$; $a \gg r_0$ и $b \gg r_0$;

все размеры в метрах.

Индуктивность тороида, Гн (рис. 4-60), с магнитопроводом круглого сечения из неферромагнитного материала

$$L = \frac{2\pi \cdot 10^{-7} \omega^2 d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}},$$

где D — средний диаметр тороида и d — диаметр витков, м; ω — число витков; если обмотка неоднослойная, то предполагается, что размеры всех витков практически одинаковы.

Индуктивность тороида, Гн (рис. 4-61), с магнитопроводом прямоугольного сечения из неферромагнитного материала

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \omega^2 h \ln (r_2/r_1),$$

где h — в м; ω — число витков; если обмотка неоднослойная, то предполагается, что

размеры всех витков практически одинаковы.

Взаимная индуктивность, Гн, двух катушек с числами витков w_1 , w_2 и с общим магнитопроводом круглого сечения из неферромагнитного материала (рис. 4-60)

$$M = 2\pi \cdot 10^{-7} w_1 w_2 \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}},$$

где D — средний диаметр магнитопровода и d — диаметр витков, м; предполагается,

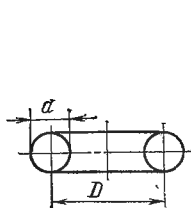


Рис. 4-60.

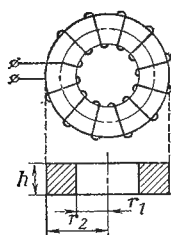


Рис. 4-61.

что размеры всех витков практически одинаковы.

Взаимная индуктивность, Гн, двух катушек с числами витков w_1 , w_2 и с общим магнитопроводом прямоугольного сечения из неферромагнитного материала (рис. 4-61)

$$M = 2 \cdot 10^{-7} w_1 w_2 h \ln(r_2/r_1),$$

где h , r_1 и r_2 — в м; предполагается, что размеры всех витков практически одинаковы.

Индуктивность коаксиального кабеля

При малой толщине оболочки, Гн,

$$L = 2 \cdot 10^{-7} l [\ln(R_2/R_1) + 0,25],$$

где l — длина кабеля, м; R_1 — радиус сечения внутреннего электрода (жилы); R_2 — внутренний радиус оболочки.

Примечание. Во всех формулах для индуктивности предполагается, что провод сделан из неферромагнитного материала, частота низкая (поверхностный эффект можно не учитывать).

Литература [4-54 — 4-56].

Список литературы

Общая литература

4-1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1978. — 528 с. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — М.: Высшая школа, 1978. — 231 с.

4-2. Нейман Л. Р., Демирьян К. С. Теоретические основы электротехники, т. 1. — Л.: Энергия, 1975. — 522 с. Нейман Л. Р., Демирьян К. С. — Теоретические основы электротехники, т. 2. — Л.: Энергия, 1975. — 407 с.

4-3. Основы теории цепей/Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. — М.: Энергия, 1975. — 752 с.

4-4. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники, т. 1. — М.: Энергия, 1972. — 239 с.

Жуховицкий Б. Я., Негневицкий И. Б. Теоретические основы электротехники, т. 2. — М.: Энергия, 1972. — 200 с. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники, т. 3. — М.: Энергия, 1975. — 208 с.

4-5. Теоретические основы электротехники. — Т. 1. Основы теории линейных цепей/Под ред. П. А. Ионкина. — М.: Высшая школа, 1976. — 544 с. Теоретические основы электротехники. Т. II. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля/Под ред. П. А. Ионкина. — М.: Высшая школа, 1976. — 383 с.

4-6. Теоретические основы электротехники. В 3-х ч. Ч. I. Атабеков Г. И. Линейные электрические цепи. — М.: Энергия, 1978. — 592 с. Ч. II и III/Атабеков Г. И., Купалаев С. Д., Тимофеев А. В., Хухриков С. С. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. — М.: Энергия, 1979. — 432 с.

Дополнительная литература

4-7. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. — М.: Энергия, 1969. — 424 с.

4-8. Белецкий А. Ф. Основы теории линейных электрических цепей. — М.: Связь, 1967. — 608 с.

4-9. Бессонов Л. А. Линейные электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1974. — 320 с.

4-10. Дезер Ч. А., Ку Э. С. Основы теории цепей. — М.: Связь, 1976. — 288 с.

4-11. Толстов Ю. Г. Теория линейных электрических цепей. — М.: Высшая школа, 1978. — 279 с.

4-12. Теория линейных электрических цепей/Б. П. Афанасьев, О. Е. Гольдин, И. Г. Клячкин, Г. Я. Пинес. — М.: Высшая школа, 1973. — 592 с.

4-13. Матханов П. Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. — М.: Высшая школа, 1972. — 335 с.

4-14. Максимович Н. Г. Методы топологического анализа электрических цепей. — Львов: Изд. Львовского ун-та, 1970. — 258 с.

4-15. Карин Ш. Теория цепей. Анализ и синтез. — М.: Связь, 1973. — 368 с.

4-16. Сешу С. и Рид М. Б. Линейные графы и электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1971. — 448 с.

4-17. Харари Ф. Теория графов. — М.: Мир, 1973. — 300 с.

4-18. Оре О. Теория графов. — М.: Наука, 1968. — 352 с.

4-19. Зелингер Дж. Основы матричного анализа и синтеза. — М.: Советское радио, 1970. — 240 с.

4-20. Абрахамс Дж. и Каверли Дж. Анализ электрических цепей методом графов. — М.: Мир, 1967. — 175 с.

4-21. Пенфилд П., Спенс Р., Дюнкер С. Энергетическая теория электрических цепей. — М.: Энергия, 1974. — 152 с.

4-22. Техника высоких напряжений/Под ред. Д. В. Разевига. — М.: Энергия, 1976. — 488 с.

4-23. Федосеев А. М. Основы релейной защиты. — М.: Госэнергоиздат, 1961. — 440 с.

4-24. Зиновьев А. Л. Введение в теорию сигналов и цепей. — М.: Высшая школа, 1975. — 261 с.

4-25. Харкевич А. А. Спектры и анализ. — М.: Физматгиз, 1962. — 236 с.

4-26. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Советское радио, 1977. — 607 с.

4-27. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. — М.: Энергия, 1976. — 496 с.

4-28. Бессонов Л. А. Нелинейные электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1977. — 343 с.

4-29. Матханов П. Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи. — М.: Высшая школа, 1977. — 272 с.

4-30. Кушир В. Ф. и Ферман Б. А. Теория нелинейных электрических цепей. — М.: Связь, 1974. — 383 с.

4-31. Мэзон С. и Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963. — 619 с.

4-32. Круг К. А. Переходные процессы в линейных электрических цепях. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1948. — 344 с.

4-33. Диткин В. А. и Прудников А. П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. — М.: Наука, 1974. — 542 с.

- 4-34. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. — М.: Наука, 1971. — 288 с.
- 4-35. Левинштейн М. Л. Операционное исчисление в задачах электротехники. — Л.: Энергия, 1972. — 358 с.
- 4-36. Теумин И. И. Справочник по переходным электрическим процессам. — М.: Связьиздат, 1951. — 411 с.
- 4-37. Заде Л., Дезоер Ч. Теория линейных систем. Метод пространства состояний. — М.: Наука, 1970. — 704 с.
- 4-38. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. — М.: Физматгиз, 1959. — 915 с.
- 4-39. Бабаков И. М. Теория колебаний. — М.: Наука, 1968. — 559 с.
- 4-40. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. — М.: Наука, 1967. — 575 с.
- 4-41. Зелях Э. В. Основы общей теории линейных электрических схем. — М.: Изд-во АН СССР, 1951. — 336 с.
- 4-42. Матханов П. Н. Основы синтеза линейных электрических цепей. — М.: Высшая школа, 1976. — 208 с.
- 4-43. Гиллемин Э. А. Синтез пассивных цепей. — М.: Связь, 1970. — 720 с.
- 4-44. Босый Н. Д. Электрические фильтры. — Киев: Гостехиздат УССР, 1959. — 616 с.
- 4-45. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.: Энергия, 1970. — 519 с.

- 4-46. Караев Р. И. Переходные процессы в линиях большой протяженности. — М.: Энергия, 1978. — 192 с.
- 4-47. Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. — М.: Гостехиздат, 1954. — 688 с.
- 4-48. Тамм И. Е. Основы теории электричества. — М.: Наука, 1976. — 616 с.
- 4-49. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. [Вып. 5]. Электричество и магнетизм. — М.: Мир, 1977. — 300 с.
- 4-50. Иоссель Ю. Я. Расчет потенциальных полей в энергетике (справочная книга). — Л.: Энергия, 1978. — 350 с.
- 4-51. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. — М.: Связь, 1973. — 480 с.
- 4-52. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. [Вып. 6]. Электродинамика. — М.: Мир, 1977. — 347 с.
- 4-53. Тозони О. В. и Маергойз И. Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. — Киев: Техника, 1974. — 352 с.
- 4-54. Гоноровский И. С. Проектирование LCR радиопередатчиков. — М.: Связьиздат, 1934. — 292 с.
- 4-55. Калантаров П. Л. и Цейтлин Л. А. Расчет индуктивности. Справочная книга. — Л.: Энергия, 1970. — 415 с.
- 4-56. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергия, 1969. — 240 с.

Раздел 5

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

СОДЕРЖАНИЕ

5-1. Основные понятия	175
5-2. Виды и методы измерений	176
5-3. Средства измерений электрических величин и их основные характеристики	177
5-4. Измерение напряжений и токов	182
5-5. Измерение параметров электрических цепей	183
5-6. Измерение мощности	187
5-7. Измерение расхода электрической энергии	190
5-8. Мосты измерительные постоянного и переменного тока	190
5-9. Компенсаторы измерительные постоянного и переменного тока	191
5-10. Цифровые вольтметры постоянного и переменного тока	191
5-11. Комбинированные цифровые приборы	193
5-12. Щитовые аналоговые приборы	194

Общие сведения (194). Приборы малого габарита (197). Приборы среднего габарита (198)	
5-13. Погрешности измерений. Обработка прямых измерений (197). Способы описания случайных погрешностей (202). Доверительные интервалы (203). Обработка прямых измерений (204). Систематические погрешности измерений (205)	201
5-14. Представление результатов измерений	207
5-15. Перечень государственных стандартов на электроизмерительные приборы	208
5-16. Методы измерения магнитных величин	210
5-17. Средства измерения магнитных величин	214
Список литературы	221

5-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Измерением физической величины называют последовательность операций, выполняемых опытным путем при помощи технических средств, специально предназначенных для этой цели, по нахождению с известной точностью значения физической величины, характеризующей исследуемый объект или явление. Физическая величина оп-

ределяется как свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов (физических систем, их состояний и происходящих в них процессов), но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них. Физическими величинами являются ток, напряжение, сопротивление электрической цепи и т. п. Говорят, например, «ток 5 ампер или напряжение 3 вольты». Выражения «величина тока 5 ам-

пер» или «величина напряжения 3 вольта» являются неправильными, так как в данном случае ток и напряжение являются физическими величинами, следовательно, получается тавтология (величина величины).

Часто вместо термина «величина» пользуются термином «параметр сигнала», понимая под сигналом некоторый физический процесс.

Поскольку физическая величина применяется для количественной оценки интенсивности проявления определенного свойства, то она должна обладать размером. Размер физической величины — это количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина».

Для определения размера физической величины вводится понятие единица физической величины — это физическая величина, размеру которой, по определению, присвоено числовое значение 1. Единицы физических величин воспроизводятся посредством эталонов и мер.

Физические величины подразделяются на основные и производные.

Под основной понимается величина, которая определяется независимо от других величин.

Производными называются величины, определяемые через основные, т. е. связанные с основными определенными соотношениями.

Оценка конкретной физической величины в виде произведения отвлеченного числа на принятую для нее единицу называется значением физической величины.

В измерительной технике важную роль играет понятие истинного значения физической величины, под которым понимается значение физической величины, которое стремятся найти в соответствии с поставленной задачей и которое абсолютно верно отражало бы эту величину. Определить экспериментальным путем истинное значение физической величины невозможно. Дело в том, что как бы тщательно ни организовывался эксперимент, условия, в которых он производится, принципиально не могут быть абсолютно неизменными и они будут влиять на результат определения числового значения физической величины. Кроме того, всегда остается некоторая неопределенность, присущая самой физической величине в каждом конкретном случае. Таким образом, истинное значение физической величины является идеализацией и часто не только не известно экспериментатору, но и физически не существует. Тем не менее этим понятием широко пользуются в теории измерений.

На практике вместо истинного значения физической величины часто пользуются понятием действительного значения физической величины, под которым понимается значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для поставленной измери-

тельной задачи может его заменить. Практически действительное значение физической величины определяется посредством образцовых мер и приборов, погрешностями которых в результате измерения можно пренебречь.

В зависимости от поведения во времени физической величина может быть статической или динамической.

Значение физической величины, найденное путем ее измерения, называют результатом измерения. Важной характеристикой любого результата измерения является его точность, которая отражает близость результата измерения к истинному значению измеряемой величины. На практике понятием «точность» обычно пользуются только для качественной характеристики измерений — низкая точность, высокая точность и т. п. Общепринятого количественного способа выражения точности в настоящее время не существует, для этой цели пользуются понятием погрешности измерения.

Погрешность измерения — это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

5-2. ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На практике интересующая нас величина не всегда поддается непосредственному измерению. Числовые значения таких величин обычно определяются путем обработки результатов измерения других величин, подающихся непосредственному измерению.

В зависимости от вида функциональной связи между искомой и непосредственно измеряемыми величинами и от способа получения числового значения измеряемой величины все измерения классифицируются на четыре вида: прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямым называют измерение, при котором входной измерительный сигнал содержит информацию о физической величине, подлежит измерению в соответствии с поставленной измерительной задачей. Примером прямых измерений может служить измерение напряжения вольтметром. При этом не учитывается простота или сложность измерительного эксперимента. Прямое измерение может содержать ряд наблюдений, а результат измерения вычисляется по определенным формулам. Прямые измерения лежат в основе других видов измерений.

Косвенным называют измерение, при котором искомое значение вычисляют на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Примером косвенного измерения может служить определение удельного сопротивления материала путем прямых измерений длины, площади поперечного сечения и электрического сопротивления образца из данного материала.

Совокупные измерения — измерения нескольких одноименных физических вели-

чин путем выполнения прямых измерений различных сочетаний этих величин.

Совместные измерения — измерения, состоящие из прямых измерений нескольких физических величин в изменяющихся условиях и последующего нахождения зависимости между этими величинами. Примером совместных измерений может служить экспериментальное определение электрического сопротивления и температурного коэффициента сопротивления при различных температурах.

По зависимости от режима изменения величины различают статическое и динамическое измерение.

Под статическим измерением понимают измерение постоянной и пренебрежимо мало изменяющейся физической величины либо параметра стационарного процесса, при котором искомое значение находят по установившемуся выходному измерительному сигналу.

Под динамическим измерением понимают измерение переменной во времени, кратковременной или постоянной физической величины, при котором одно или ряд искоемых значений находят по изменяющемуся во времени выходному измерительному сигналу.

Организация измерительного эксперимента может основываться на различных приемах сравнения измеряемой величины с мерой. При этом учитываются требуемые точность, удобство и быстрота измерения. Метод решения измерительной задачи, характеризующий используемыми физическими явлениями и средствами измерений, а также приемами их использования, называется методом измерений.

Различают следующие методы измерений: прямым преобразованием и сравнения с мерой. Метод сравнения с мерой в свою очередь подразделяется на методы дифференциальный, нулевой, замещения, перестановки, дополнения, совпадений.

Дифференциальный метод — это метод сравнения, при котором образуют и оценивают измерительный сигнал, являющийся разностью измерительных сигналов, поступающих от исследуемого объекта и меры. Этот метод позволяет получить результат измерения с высокой точностью даже в случае применения сравнительно неточных измерительных приборов при условии, что точность применяемых мер достаточно высока. Например, если разность между значением измеряемой величины и меры составляет 1% и оценивается измерительным прибором с погрешностью 1%, то погрешность измерения этой величины будет 0,01%. Дифференциальный метод широко используется в измерительной технике — на нем основана работа неуравновешенных мостов постоянного тока и др.

Нулевой метод — метод сравнения, при котором уравнивают измерительные сигналы, поступающие от исследуемого объекта и меры. Нулевой метод является предельным случаем дифференциального метода и

сохраняет преимущества последнего; применяется в уравновешенных мостах, компенсаторах, цифровых приборах и т. д.

Метод замещения — метод сравнения, при котором измерительный сигнал, поступающий от исследуемого объекта, замещают сигналом, поступающим от меры. Метод замещения позволяет исключить многие источники погрешностей измерительных приборов, обусловленные смещением нулевых уровней и нестабильностью коэффициентов преобразования функциональных узлов. Метод замещения применяется в цифровых вольтметрах, аналого-цифровых преобразователях и т. д.

Метод перестановки — метод сравнения, при котором измерительные сигналы, поступающие от исследуемого объекта и меры, сравнивают до и после их взаимной перестановки.

Метод дополнения — метод сравнения, при котором измерительный сигнал, поступающий от исследуемого объекта, дополняют измерительным сигналом, поступающим от меры, и получают заданный суммарный измерительный сигнал.

Метод совпадений — метод сравнения, при котором образуют разность измерительных сигналов, поступающих от исследуемого объекта и меры, и оценивают ее по совпадениям или биениям.

5-3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Средство измерений — это техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики.

По характеру участия в измерительном процессе все средства можно разделить на следующие группы: меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные каналы, измерительные установки, измерительные системы, измерительная аппаратура.

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения одной или нескольких конкретных физических величин, заданных по значению.

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для преобразования измерения измерительного сигнала в форму, позволяющую наблюдателю воспринять значение измеряемой физической величины.

Измерительный преобразователь — средство измерений, предназначенное для преобразования измерительного сигнала в промежуточную форму.

Меры, измерительные приборы или измерительные преобразователи, признанные метрологической службой пригодными для проверки по ним других средств измерений, называются образцовыми средствами измерения. Особенность образцовых средств измерения заключается в том, что они предназначены только для проверки по ним других средств измерений. Поэтому они должны

храниться в отдельных помещениях и применение их для выполнения технических измерений не допускается.

Измерительный канал — функционально объединенная совокупность средств измерений и других технических средств, предназначенная для последовательного преобразования одного измерительного сигнала.

Измерительная установка — функционально объединенная совокупность средств измерений нескольких физических величин и вспомогательных устройств, предназначенная для получения измерительной информации об исследуемом объекте в условиях, изменяемых в соответствии с поставленной измерительной задачей. Если измерительная установка содержит средства автоматизации операций, которые полностью исключают участие наблюдателя, то ее называют автоматической, не полностью — полуавтоматической.

Измерительная система — функционально объединенная совокупность средств измерений нескольких физических величин и вспомогательных устройств, предназначенная для получения измерительной информации об исследуемом объекте в условиях его функционирования или хранения. Измерительная система, в состав которой входят средства автоматизации операций и контроля ее исправности, называется автоматизированной.

Измерительная аппаратура — совокупность отдельных средств измерений, вспомогательных устройств и (или) их функционально объединенных совокупностей.

Точность является основным качеством средства измерения, отражающим близость к нулю его погрешностей. Точность средств измерений характеризуют нормируемыми метрологическими характеристиками в соответствии с ГОСТ 8009-72.

Погрешности средств измерения классифицируются по следующим признакам: способу выражения, характеру проявления, зависимости от значения измеряемой величины, режиму изменения измеряемой величины, причине и условиям возникновения (рис. 5-1).

По способу выражения погрешности делятся на абсолютные, приведенные и относительные.

Абсолютная погрешность меры Δx — это разность между номинальным значением меры $x_{\text{ном}}$ и истинным значением воспроизводимой ею величины x :

$$\Delta x = x_{\text{ном}} - x.$$

Абсолютная погрешность измерительного прибора Δ — это разность между показанием прибора A и истинным значением измеряемой величины $A_{\text{и}}$:

$$\Delta = A - A_{\text{и}}.$$

Приведенная погрешность измерительного прибора γ определяется как отношение абсолютной погрешности к нормирующему

значению $A_{\text{н}}$ и выражается обычно в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_{\text{н}}} 100\%.$$

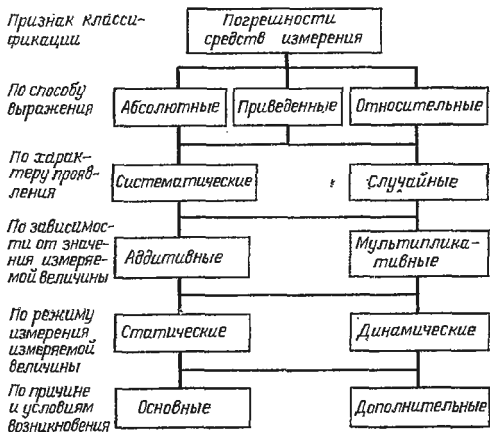


Рис. 5-1. Систематизация погрешностей средств измерения.

Нормирующее значение — условно принятое значение, которое принимается равным:

а) для средств измерений с равномерной или степенной шкалой, если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы, — конечному значению рабочей части шкалы;

б) для средств измерения с равномерной или степенной шкалой, если нулевая отметка находится внутри шкалы, — арифметической сумме конечных значений рабочей части шкал (без учета их знака);

в) для средств измерений с логарифмической или гиперболической шкалой — всей длине шкалы.

Относительная погрешность меры (измерительного прибора) выражается отношением абсолютной погрешности меры (измерительного прибора) к истинному значению воспроизводимой (измеряемой) ею (им) величины:

$$\delta = \Delta / A.$$

Относительная погрешность может быть выражена в процентах.

По характеру проявления погрешности делятся на систематические и случайные. Систематическая погрешность средства измерений — это составляющая погрешности средства измерений, остающаяся постоянной или изменяющаяся как детерминированная функция некоторых аргументов. Случайная погрешность средства измерений — это составляющая погрешности средства измерений, изменяющаяся как центрированная случайная величина.

По зависимости от значения измеряемой величины погрешности средств измерения делятся на аддитивные и мультипликативные. Аддитивные погрешности не зависят от значения измеряемой величины, мультипликативные — пропорциональны последней. Источником аддитивной погрешности могут служить напряжения смещения в усилителях постоянного тока, шумы элементов схемы, внешние наводки и утечки в схеме, термо-ЭДС и пр. Источники мультипликативной погрешности — нестабильность или несоответствие номинальным значениям коэффициентов передач отдельных функциональных узлов средств измерения: делителей напряжения, усилителей и т. п.

По режиму изменения измеряемой величины погрешности средств измерений разделяют на статические и динамические. Статическая погрешность возникает при измерении постоянных величин. Динамические погрешности появляются при измерении переменных во времени величин. Причина динамических погрешностей заключается в инерционности средств измерения.

По причине и условиям возникновения погрешностей средств измерения различают основные и дополнительные погрешности.

Основная погрешность — погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях, при которых влияющие величины имеют нормальные значения (или находятся в пределах нормальной области значений), устанавливаемые в стандартах на средства измерения данного вида.

Термин дополнительная погрешность применяется только к мерам. Дополнительная погрешность — составляющая погрешности средства измерений, вызываемая отклонением одной или более влияющих величин от нормального значения или выходом за пределы нормальной области значений. Применительно к измерительным приборам пользуются термином изменение показаний измерительного прибора под действием влияющей величины, под которым понимают изменение погрешности измерительного прибора, вызванное отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом их за пределы нормальной области значений. Область значений влияющей величины, устанавливаемая в стандартах или технических условиях на средства измерений, в пределах которой значение дополнительной погрешности (изменение показаний) не должно превышать установленных пределов, называют расширенной областью.

Предел допускаемой погрешности средства измерений — метрологическая характеристика средства измерений, представляющая собой предел, который не должна превышать погрешность средства измерений. Это понятие применимо к основной и дополнительной погрешностям, а также к изменению показаний.

Обобщенной характеристикой средства измерений, отражающей уровень их точности и представленной набором нормирован-

ных метрологических характеристик, является класс точности, который характеризует средство измерений, но не является непосредственной характеристикой точности измерения, выполняемого с помощью данного средства. Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей средств измерений для каждого из классов точности устанавливаются в виде абсолютных, приведенных или относительных погрешностей или в виде определенного числа делений.

ГОСТ 13600-68 предусматривает следующие способы выражения пределов допускаемой погрешностей:

1. Абсолютная погрешность должна выражаться

а) одним значением

$$\Delta = \pm a,$$

где Δ — предел допускаемой абсолютной погрешности; a — постоянная величина;

б) двучленной формулой

$$\Delta = \pm (a + bx),$$

где a и b — постоянные величины; x — номинальное значение, показание или сигнал (значение x принимается без учета знака). Двучленная формула применяется в тех случаях, при которых предел допускаемой погрешности зависит от номинального значения, показания или сигнала;

в) в виде таблицы пределов допускаемых погрешностей для разных номинальных значений, показаний или сигналов.

2. Приведенная погрешность определяется формулой

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{x_N} 100\%,$$

где γ — предел допускаемой приведенной погрешности в процентах от нормирующего значения; x_N — нормирующее значение.

3. Относительная погрешность выражается одной из формул

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{x} 100 = \pm c\%,$$

или

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{x} 100 = \pm \left[c + d \left(\frac{x_K}{x} - 1 \right) \right] \%,$$

где δ — предел допускаемой относительной погрешности в процентах значения измеряемой величины; x_K — конечное значение диапазона измерений или диапазона значений сигнала на входе преобразователя; c , d — постоянные числа.

Примечание. Значения x и x_K принимаются без учета знака.

В последней формуле первое слагаемое в правой части (коэффициент c) отражает относительную погрешность средства измерения при $x = x_K$, второе слагаемое характеризует возрастание относительной погрешности при уменьшении показаний средства измерения.

Нормирование пределов допускаемых дополнительных погрешностей, вызываемых действием отдельных влияющих величин, производится одним из следующих двух способов:

а) указанием конкретных значений пределов допускаемых дополнительных погрешностей для расширенной области значений влияющей величины;

б) указанием функциональной зависимости допускаемой дополнительной погрешности от изменения влияющей величины.

Основная и дополнительная погрешности, как правило, выражаются одним и тем же способом, хотя в отдельных случаях допускается применение разных способов их выражения.

Условные обозначения классов точности зависят от средств измерений.

В случае наборов мер, предел допускаемой основной погрешности которых выражается в виде абсолютной погрешности, класс точности обозначается номерами: кл. 1, кл. 2, кл. 3 и т. д., причем большие порядковые номера соответствуют большим погрешностям. Так обозначают классы точности наборов нормальных элементов (мер напряжения), образцовых катушек сопротивления (мер сопротивления электрической цепи) и т. п.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в процентах значения измеряемой величины (δ), обозначаются помещенными в кружок числами, совпадающими со значением предела допускаемой основной погрешности. Например 0,5 для $\delta = \pm 0,5\%$. К таким средствам измерения относятся однозначные меры (которые используются не в наборе), интегрирующие приборы — счетчики электрической энергии и пр.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в процентах нормирующего значения (γ), определенного в единицах измеряемой величины, обозначаются числами, совпадающими со значением предела допускаемой основной приведенной погрешности. Например 1,5 для $\gamma = \pm 1,5\%$. К таким средствам измерения относятся главным образом показывающие и самопишущие приборы.

Согласно ГОСТ 13600-68 средствам измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в виде приведенных погрешностей, присваиваются классы точности, выбираемые из ряда чисел: 1, 1,5; 2; 2,5; (3); 4; 5 и 6×10^n , где $n = -1; 0; -1; -2$ и т. д.; число 3, стоящее в скобках, допущено к применению, но не рекомендуется.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются двучленной формулой $\delta = \pm \left[c \pm d \left(\frac{x_R}{x} - 1 \right) \right]$, обозначаются двумя числами, выражающими c и d в процентах

Таблица 5-1		
Нормальные условия эксплуатации средств измерений		
Влияющая величина	Допустимое значение отклонения параметра	
	для приборов классов 0,05—0,5	для приборов классов 1,0—4,0
Рабочее положение	Указанное на шкале с допуском	
	$\pm 1^\circ; \pm 0,2^\circ$	$\pm 2^\circ$
Температура	Указанная на шкале с допуском	
	$\pm 2^\circ \text{ C}$	$\pm 5^\circ \text{ C}$
	Если указания отсутствуют, то	
	от 18 до 22° C	от 15 до 25° C
Напряжение	Указанное на шкале с допуском	
	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$
Частота	Указанная на шкале с допуском	
	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$
	Если указания отсутствуют, то	
	49—51 Гц	49—51 Гц

и разделенными косой чертой *c/d*. Например, для $\delta = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{x_R}{x} - 1 \right) \right]$, класс точности обозначается 0,02/0,01. К таким приборам относятся цифровые вольтметры, цифровые мосты и т. п.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в процентах нормирующего значения, определенного длиной шкалы, обозначаются числом в процентах, помещенным между двумя линиями, расположенными под углом. Например, 0,5. К таким средствам измерения относятся показывающие приборы с гиперболической или логарифмической шкалой.

Нормальное значение и область нормальных значений влияющей величины, если она нанесена на средство измерения, подчеркивается. Расширенная область значений влияющей величины указывается без подчеркивания.

Нормальные условия эксплуатации средств измерения представлены в табл. 5-1.

Таблица 5-2

Группы электронизмерительных приборов

Условия эксплуатации	Параметры окружающего воздуха	Группа приборов				
		А	Б	В ₁	В ₂	В ₃
Рабочие	Температура, °С	От 10 до 35	От -30 до +40	От -40 до +50	От -50 до +60	От -50 до +80
	Относительная влажность, % (при температуре, °С)	80(+30)	90(+30)	95(+35)	95(+35)	98(+40)
Предельные	Температура, °С	От -40 до +60	От -40 до +60	От -50 до +60	От -60 до +65	От -60 до +80
	Относительная влажность, % (при температуре, °С)	95(+30)	95(+30)	95(+60)	95(+60)	98(+60)

При нормальных условиях эксплуатации относительная влажность должна находиться в пределах $65 \pm 15\%$, а атмосферное давление $(750 \pm 30) \cdot 133$ Па (750 ± 30 мм рт. ст.).

По диапазонам рабочих температур и влажности электроизмерительные приборы делятся на пять групп (табл. 5-2).

Под рабочими условиями эксплуатации понимаются допустимые значения температуры и влажности окружающего воздуха, при которых приборы сохраняют свою работоспособность и нормированную для них точность в течение длительного времени.

Под предельными условиями эксплуатации понимаются граничные значения температуры и влажности окружающего воздуха, при которых приборы могут храниться или транспортироваться, сохраняя свою работоспособность и нормированную для них точность.

Допустимое изменение показаний приборов при изменении температуры на каждые 10°C относительно нормального значения в пределах рабочих температур представлено в табл. 5-3.

Таблица 5-3

Допустимое изменение показаний приборов, %

Класс точности прибора	Группы			
	А	Б	В ₁ , В ₂	В ₃
0,05	$\pm 0,05$	—	—	—
0,1	$\pm 0,1$	—	—	—
0,2	$\pm 0,2$	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	—
0,5	$\pm 0,5$	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$
1,0	$\pm 1,0$	$\pm 0,8$	$\pm 0,5$	$\pm 0,4$
1,5	$\pm 1,5$	$\pm 1,2$	$\pm 0,8$	$\pm 0,6$
2,5	$\pm 2,5$	$\pm 2,0$	$\pm 1,2$	$\pm 0,8$
4,5	$\pm 4,0$	$\pm 3,0$	$\pm 2,0$	$\pm 1,2$

На показание приборов влияют внешние электромагнитные и электрические поля. По степени защищенности от влияния ука-

Таблица 5-4

Допустимые изменения показаний приборов, %

Класс точности прибора	При действии внешнего магнитного или электрического поля		При действии ферромагнитного цита или рядом расположенного прибора	
	Категория I	Категория II	Категория I	Категория II
0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0	$\pm 0,5$ $\pm 0,5$ $\pm 0,1$ $\pm 2,5$	$\pm 1,0$ $\pm 1,0$ $\pm 2,5$ $\pm 5,0$	$\pm 0,25$ $\pm 0,25$ $\pm 0,5$ $\pm 0,5$	$\pm 0,5$ $\pm 0,5$ $\pm 1,0$ $\pm 1,0$

занных полей электроизмерительные приборы делятся на две категории (табл. 5-4). При этом нормируются границы дополнительных погрешностей под воздействием внешнего магнитного поля напряженностью 400 А/м или электрического поля, напряженность которого, кВ/м, рассчитывается по формуле

$$E = 10 + U,$$

где U — номинальное испытательное напряжение, кВ.

По устойчивости к механическим воздействиям приборы делятся на:

1) обыкновенные — предназначенные для работы в условиях отсутствия тряски, вибраций или ударных сотрясений;

2) обыкновенные с повышенной механической прочностью — предназначенные для работы в условиях отсутствия тряски, вибраций и ударных сотрясений, но могущие подвергаться им в процессе эксплуатации, например при транспортировке;

3) устойчивые к механическим воздействиям — способные противостоять действию тряски, вибрации или ударным сотрясениям;

4) тряскопрочные — выдерживающие разрушающее влияние тряски без нарушения своих функций;

5) нечувствительные к тряске — выполняющие свои функции в заданных условиях тряски;

6) вибропрочные — выдерживающие разрушающие действия вибраций без нарушения своих функций;

7) нечувствительные к вибрации — выполняющие свои функции при вибрациях в заданном диапазоне частот и ускорений;

8) ударопрочные — выдерживающие интенсивные механические удары без нарушения своих функций.

По защищенности от влияний окружающей среды приборы имеют исполнения:

1) обыкновенное — предохраняющее прибор от загрязнений и механических повреждений;

2) брызгозащищенное — защищающее от попадания внутрь прибора брызг воды;

3) водозащищенное — защищающее от попадания внутрь прибора воды при обливании волной или струей воды под давлением;

4) герметичное — защищающее от попадания воды внутрь корпуса при полном погружении в воду;

5) газозащищенное — предохраняющее от обмена воздухом между внутренним объемом прибора и внешней средой;

6) пылезащищенное — защищающее от попадания внутрь прибора пыли;

7) защищенное от агрессивной среды — обеспечивающее длительную работу прибора в условиях агрессивной окружающей среды;

8) взрывозащищенное — обеспечивающее безопасное применение прибора в условиях взрывоопасных помещений.

5.4. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Измерение напряжений и токов производится посредством измерительных приборов, основанных на методе непосредственной оценки или методе сравнения.

Приборы, основанные на методе непосредственной оценки, представляют собой сочетание измерительного механизма с измерительным преобразователем.

Применяются следующие системы измерительных механизмов: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, ферродинамическая, электростатическая. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы реагирует на среднее значение тока, электростатической системы — на действующее значение напряжения, прочих — на действующее значение тока, протекающего через измерительный механизм.

Основное достоинство измерительного механизма магнитоэлектрической системы — малая в сравнении с другими системами (кроме электростатической) потребляемая

мощность. Поэтому для измерений постоянных токов и напряжений рекомендуется применять приборы на основе этого механизма.

Приборы на основе измерительного механизма магнитоэлектрической системы в сочетании с выпрямительным, термоэлектрическим и электронным измерительными преобразователями применяются для измерения переменных токов и напряжений. Их называют выпрямительными, термоэлектри-

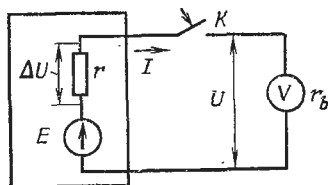


Рис. 5-2. Измерение напряжения активного двухполюсника.

ческими и электронными приборами соответственно.

При измерении вольтметр подключается к выводам электрической цепи, напряжение между которыми измеряется. Амперметр включается в рассечку цепи. Приборы могут быть постоянно включенными в цепь, или включаться только для измерения и затем выключаться. В последнем случае мощность, потребляемая прибором (конечное значение его входного сопротивления), приводит к погрешностям. Покажем это на примере измерения напряжения холостого хода на выводах активного двухполюсника (рис. 5-2). До замыкания ключа K напряжение на выводах активного двухполюсника равно E . После замыкания ключа в цепи возникает ток I и напряжение на выводах двухполюсника снижается вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении двухполюсника:

$$\Delta U = Ir = E \frac{r}{r + r_b}.$$

Результат измерения равен $U = E - \Delta U$. Отсюда погрешность измерения

$$\delta = \frac{U - E}{E} = - \frac{r}{r + r_b} \approx - \frac{r}{r_b}.$$

Снизить указанную погрешность можно только выбором вольтметра с достаточно большим по сравнению с r входным сопротивлением.

Применительно к измерению тока амперметром требование снижения методической погрешности заключается в выборе амперметра с пренебрежимо малым собственным сопротивлением по сравнению с сопротивлением цепи, в которой измеряется ток.

Расширение пределов измерения приборов, основанных на методе непосредственной оценки, осуществляется посредством

добавочных резисторов, делителей напряжения, шунтов и трансформаторов тока и напряжения. На рис. 5-3 показаны схемы включения приборов с указанными преобразователями.

Добавочные резисторы выполняются внутренними (располагаются внутри корпуса прибора и рассчитываются на измерение напряжений до 500 В) или наружными. В переносных приборах добавочные резисторы обычно выполняются секционными на

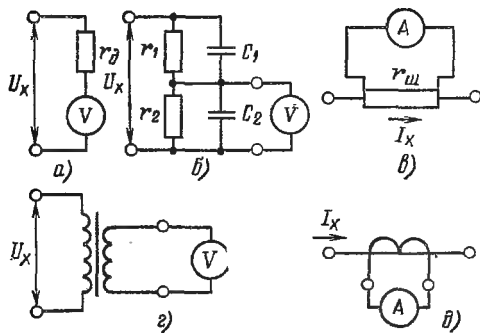


Рис. 5-3. Схемы включения приборов при измерении напряжений и токов.

а — вольтметр с добавочным резистором r_d ; б — вольтметр с делителем напряжения; в — амперметр с шунтом $r_ш$; г — вольтметр с трансформатором напряжения; д — амперметр с трансформатором тока.

несколько пределов измерения. Параметры добавочных резисторов регламентируются ГОСТ 8623-69. Номинальные токи добавочных резисторов составляют 3, 5 и 7,5 мА. Диапазон напряжений постоянного тока, измеряемых вольтметрами с добавочными резисторами, составляет 600—5000 В. Основная погрешность добавочных резисторов лежит в пределах 0,1—0,5%.

Делители постоянного напряжения содержат только резисторы, а переменного — дополнительные конденсаторы. Дело в том, что входное сопротивление вольтметра, включенного на выход делителя напряжения, содержит заметную емкость составляющую, которая вместе с распределенной емкостью резистора r_2 представлена конденсатором C_2 (рис. 5-3). Для того чтобы коэффициент передачи делителя не зависел от частоты измеряемого напряжения, в схему вводится дополнительный конденсатор C_1 , емкость которого должна удовлетворять условию $C_1 r_1 = C_2 r_2$. При этом коэффициент передачи делителя от частоты измеряемого напряжения не зависит. Делители постоянного напряжения, предназначенные для измерительных приборов, должны удовлетворять требованиям ГОСТ 11282-65. Коэффициент деления делителей обычно выбирается кратным 10. Делители рассчитываются на входные напряжения до 1000 В. Минимальная основная погрешность коэффи-

циента деления делителей лежит в пределах 0,01—0,0005%.

Шунты обеспечивают измерение токов до 6000 А. Если измеряемые токи превышают 50—100 А, то применяют наружные шунты, которые должны удовлетворять требованиям ГОСТ 8042-61. Шунты изготавливаются на номинальные падения напряжения 60, 75, 100, 150 и 300 мВ. Основная погрешность шунтов лежит в пределах 0,005—0,5%.

Трансформаторы напряжения и тока предназначены для преобразования измеряемых напряжений и токов в стандартные: 100 $\sqrt{3}$ В, 150 В, 100 В, 100/ $\sqrt{3}$ В, 100/3 В и 5 А (реже 1; 0,5; 0,3; 0,125 А); кроме того, они обеспечивают гальваническое разделение цепей.

Точность трансформаторов характеризуется погрешностью коэффициента трансформации и угловой погрешностью. Последняя определяется как угол сдвига между вектором первичной величины и повернутым на 180° вектором вторичной величины и выражается в угловых минутах. Если повернутый вектор опережает первичный, погрешность считается положительной, в противном случае — отрицательной.

Трансформаторы напряжения применяются в цепях с напряжением до 15 000 В, выпускаются следующих классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1 и 3. Угловая погрешность лежит в пределах от ± 2 до $\pm 100'$, в зависимости от класса и нагрузки. Требования к трансформаторам напряжения регламентируются ГОСТ 1983-67 и ГОСТ 9032-69.

Трансформаторы тока применяются для измерения переменных токов до 10 000 А, выпускаются следующих классов точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3 и 10. Угловая погрешность лежит в пределах от ± 2 до $\pm 120'$ в зависимости от класса и нагрузки. Требования к трансформаторам тока регламентируются ГОСТ 7746-68 и ГОСТ 9032-69.

Точное измерение напряжений и токов производится с помощью потенциометров или цифровых вольтметров.

5-5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Для измерения параметров электрических цепей — сопротивления, емкости, индуктивности и взаимной индуктивности применяются приборы непосредственной оценки, сравнения и комбинированные приборы.

Приборы непосредственной оценки применяются при сравнительно грубых измерениях и строятся на основе логометров. Точность измерения такими приборами обычно не превышает 1%.

Комбинированные приборы обычно представляют собой вольтметр постоянного тока, содержащий преобразователи пара-

метров электрической цепи в постоянное напряжение, которое и измеряется вольтметром. Точность измерения в данном случае зависит от типа применяемого вольтметра и качества преобразователей. Комбинированные приборы на основе цифрового вольтметра обеспечивают высокую точность измерения параметров электрической цепи (например, приборы моделей Ф4801, Ц68002 и др.).

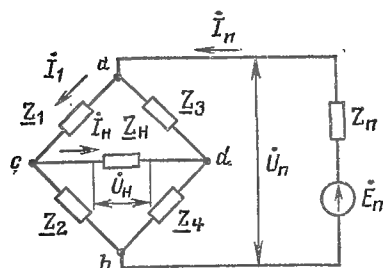


Рис. 5-4. Четырехплечий мост.

Наиболее распространенными приборами сравнения, предназначенными для измерения параметров электрических цепей, являются мосты. Мостом называется электрическая цепь, в которой можно выделить две ветви с взаимным сопротивлением, равным бесконечности при определенном соотношении между сопротивлениями цепи и равным конечному значению, если соотношение между сопротивлениями цепи изменяется.

Четырехплечий мост (рис. 5-4) содержит четыре резистора Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 , включенных в виде кольца. Точки a, b, c, d называют вершинами моста, цепь между двумя смежными вершинами — плечом моста, а между двумя противоположными вершинами — диагональю моста. В одну диагональ включен источник питания (диагональ ab на рис. 5-4), ее называют диагональю питания. Другая диагональ содержит нагрузку, ее называют диагональю нагрузки или выходной; в эту диагональ включается сравнивающее устройство (СУ) или показывающий прибор.

В зависимости от рода тока в диагонали питания моста различают мосты постоянного и переменного тока.

В зависимости от режима выходной диагонали различают мосты — уравновешенные, неуравновешенные и квазиуравновешенные.

При определенном соотношении сопротивлений плеч моста ток и напряжение в диагонали нагрузки равны нулю независимо от значения напряжения в диагонали питания, такой мост называют уравновешенным. Уравнение, устанавливающее соотношение между сопротивлением плеч уравновешенного моста, называют уравнением (условием) равновесия моста. Для четырехплечего моста это уравнение имеет вид

$$Z_1/Z_2 = Z_3/Z_4.$$

Если известно, что мост уравновешен и заданы сопротивления трех его плеч, то сопротивление четвертого плеча вычисляется из уравнения равновесия.

В неуравновешенных мостах об измеряемом сопротивлении судят по току или напряжению в диагонали нагрузки.

Квазиуравновешенные мосты представляют собой разновидность мостов переменного тока, в которых уравновешивание осуществляется только по одной из составляющих измеряемого комплексного сопротивления — модулю, фазе, активной или реактивной составляющей. Достигается это путем применения специальных сравнивающих устройств. Такие мосты называют также полууравновешенными.

Уравновешенные мосты. Разновидности мостов постоянного тока ограничены двумя вариантами — четырехплечим (одинарным) и двойным.

Если измеряемое сопротивление включено в первое плечо моста и мост уравновешен, то

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}.$$

Обычно мост приводится к равновесию плавной регулировкой R_2 . Плечи моста, содержащие R_3 и R_4 , называют плечами отношения и регулируются с кратностью 10^n ($n = \dots -2; -1; 0; +1; +2 \dots$). С помощью плеч отношения устанавливается диапазон показаний моста.

Различают три способа подключения измеряемых сопротивлений к мосту — по двух-

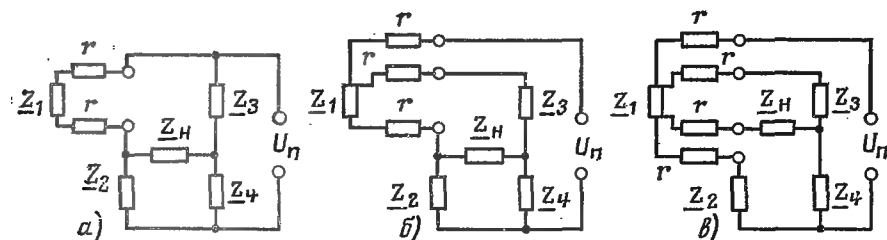


Рис. 5-5. Способы подключения измеряемого сопротивления к мосту.

a — двухпроводная схема; b — трехпроводная схема; c — четырехпроводная схема; r — сопротивление соединительного проводника.

трех- и четырехпроводной схемам (рис. 5-5). Двухпроводная схема (рис. 5-5, а) применяется в случае измерения сопротивлений средних и больших значений (более 10 Ом); трехпроводная схема (рис. 5-5, б) — в случае измерения небольших изменений сопротивления, удаленного от моста на некоторое расстояние; обычно эта схема применяется в технике измерения неэлектрических величин электрическими методами, например

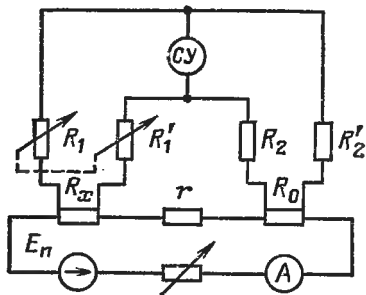


Рис. 5-6. Двойной мост.

температур с помощью термометров сопротивления. Четырехпроводная схема (рис. 5-5, в) применяется для измерения низкоомных сопротивлений (менее 10 Ом).

Измерение малых сопротивлений (менее 10 Ом) производится также двойным мостом (рис. 5-6). Измеряемое сопротивление R_x включается последовательно с образцовым R_0 , значение которого выбирается одного порядка с R_x , и подключается к источнику тока. При равновесии моста справедливо

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} + r \frac{R_1}{r + R_1' + R_2'} \left(\frac{R_2'}{R_2} - \frac{R_1'}{R_1} \right),$$

где r — сопротивление проводника, соединяющего R_x с R_0 .

В схеме моста выполняется условие $R_1 = R_1'$ и $R_2 = R_2'$; кроме того, проводник, соединяющий R_x с R_0 , выбирают коротким и большого сечения, чтобы снизить значение r . При этом уравнение равновесия упрощается:

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2}.$$

Схемы мостов переменного тока более разнообразны. На рис. 5-7, а—е представлены некоторые варианты мостов и уравнения для определения измеряемых параметров при условии, что мост уравновешен. Поскольку измеряемые величины характеризуются двумя параметрами (C_x и $\text{tg } \delta$; L_x и r_x) и уравнение равновесия моста распадается на два отдельных уравнения, то урав-

новешивание мостов производится двумя элементами.

Погрешность измерения сопротивлений четырехплечным мостом при условии, что влиянием сопротивлений подводящих проводников и проводимости изоляции плеч моста можно пренебречь, зависит от погрешности подгонки сопротивлений в плечах моста и конечного значения его чувствительности.

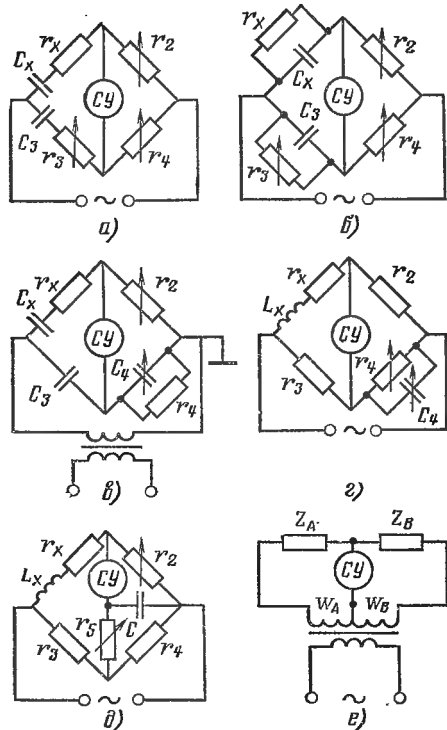


Рис. 5-7. Схемы мостов переменного тока.

а — $C_x = C_3 r_1 / r_2$; $r_x = r_2 r_3 / r_4$; $\text{tg } \delta = \omega r_3 C_3$; б — $C_x = C_3 r_4 / r_2$; $r_x = r_2 r_3 / r_4$; $\text{tg } \delta = 1 / \omega r_3 C_3$; в — $C_x = C_4 r_1 / r_2$; $r_1 = r_3 C_4 / C_3$; $\text{tg } \delta = \omega r_4 C_4$; г — $L_x = r_2 r_3 C_4$; $r_x = r_3 r_2 / r_4$; $Q = \omega r_4 C_4$; д — $L_x = C r_2 [r_3 (r_3 + r_4) + r_2 r_4] / r_4$; $r_x = r_2 r_3 / r_4$; е — $Z_A = Z_B \omega A / \omega B$.

Обозначим $\underline{Z}_i = \underline{Z}_{i, \text{н}} (1 + \underline{\delta}_i)$, где $\underline{\delta}_i$ — относительная погрешность сопротивления плеч моста. Допустим, что измеряемое сопротивление включено в первое плечо моста и в результате измерения получено значение $\underline{Z}_1$, которое вследствие наличия погрешностей сопротивлений других плеч моста отличается от действительного значения $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{10} (1 + \underline{\delta}_1)$. Тогда

$$\underline{\delta}_1 = \underline{\delta}_2 + \underline{\delta}_3 - \underline{\delta}_4.$$

Недостаточная чувствительность моста также приводит к погрешности измерения $\delta_{\text{пор}}$ из-за невозможности определить точное значение сопротивлений плеч моста, при ко-

Таблица 5-5

Чувствительность четырехплечих мостов

Обозначение	Определение	Выражение чувствительности через		
		ЭДС источника питания	Ток источника питания	Ток в измеряемом сопротивлении
S_{I0}	$\frac{d\dot{I}_H}{dZ_1}$	$-\frac{\dot{E}_H}{Z_{10}^2(1+n)(1+m)(1+K_H)(1+K_H)}$	$-\frac{\dot{I}_H}{Z_{10}} \frac{n}{(1+n)^2(1+K_H)}$	$-\frac{\dot{I}_{10}}{Z_{10}(1+n)(1+K_H)}$
S_{U0}	$\frac{d\dot{U}_H}{dZ_1}$	$-\frac{\dot{E}_H Z_H}{Z_{10}^2(1+n)(1+m)(1+K_H)(1+K_H)}$	$-\dot{I}_H \frac{Z_H}{Z_{10}} \frac{n}{(1+n)^2(1+K_H)}$	$-\dot{I}_{10} \frac{Z_H}{Z_{10}(1+n)(1+K_H)}$
T_0	$\frac{d\dot{U}_{H\infty}}{dZ_1}$	$-\frac{\dot{E}_H}{Z_{10}} \frac{m}{(1+m)^2} \frac{1}{1+K_H}$	$-\dot{I}_H \frac{m}{(1+m)^2} \frac{n}{(1+n)}$	$-\dot{I}_{10} \frac{m}{1+m}$
S'_{I0}	$\frac{d\dot{I}_H}{dZ_1} Z_{10}$	$-\frac{\dot{E}_H}{Z_{10}(1+n)(1+m)(1+K_H)(1+K_H)}$	$-\dot{I}_H \frac{n}{(1+n)^2(1+K_H)}$	$-\frac{\dot{I}_{10}}{(1+n)(1+K_H)}$
S'_{U0}	$\frac{d\dot{U}_H}{dZ_1} Z_{10}$	$-\frac{\dot{E}_H Z_H}{Z_{10}(1+n)(1+m)(1+K_H)(1+K_H)}$	$-\dot{I}_H Z_H \frac{n}{(1+n)^2(1+K_H)}$	$-\dot{I}_{10} \frac{Z_H}{(1+n)(1+K_H)}$
$\dot{I}'_0$	$\frac{d\dot{U}_{H\infty}}{dZ_1} Z_{10}$	$-\dot{E}_H \frac{m}{(1+m)^2(1+K_H)}$	$-\dot{I}_H Z_{10} \frac{m}{(1+m)^2(1+n)}$	$-\dot{I}_{10} Z_{10} \frac{m}{1+m}$

торых он уравновешен. Ввести поправку на эту составляющую погрешности невозможно, ей можно дать только приближенную оценку:

$$\delta_{\text{пор}} \leq \frac{\dot{U}_{\text{пор}}}{\left| S_{I0} \frac{Z_2 Z_3}{Z_4} Z_{c,y} \right|} = \frac{\dot{U}_{\text{пор}}}{\left| T_0 \frac{Z_2 Z_3}{Z_4} \right|},$$

где $\dot{U}_{\text{пор}}$ — пороговое напряжение сравнивающего устройства; S_{I0} , T_0 — чувствительность моста соответственно по току и по напряжению; Z_2 , Z_3 , Z_4 — сопротивления плеч моста; $Z_{c,y}$ — входное сопротивление сравнивающего устройства.

Снизить указанную погрешность можно только обеспечением высокой чувствительности моста и выбором сравнивающего устройства с достаточно малым пороговым значением напряжения.

В табл. 5-5 представлены выражения чувствительности четырехплечих мостов вблизи положения равновесия через ЭДС источника питания, ток источника питания и ток в измеряемом сопротивлении. Обозначения: $\dot{I}_H$, $\dot{U}_H$ — ток и напряжение в диагонали нагрузки моста; $\dot{U}_{H\infty}$ — напряжение в диагонали нагрузки в режиме холостого хода; Z_{10} — значение измеряемого сопротивления Z_4 , при котором мост уравновешен; $m = Z_2/Z_{10}$, $n = Z_3/Z_{10}$; K_H , K_H — соответственно коэффициенты согласования диагона-

лей питания и нагрузки с мостом:

$$K_H = \frac{Z_H}{Z_{10}} \frac{1+n}{n(1+m)};$$

$$K_H = \frac{Z_H}{Z_{10}} \frac{1+m}{m(1+n)};$$

Z_H — внутреннее сопротивление источника питания; Z_H — сопротивление в диагонали нагрузки; $\dot{E}_H$ — ЭДС источника питания; $\dot{I}_H$ — ток источника питания; $\dot{I}_{10}$ — ток в измеряемом сопротивлении при равновесии моста.

Неуравновешенные мосты. В общем случае зависимость между приращениями тока $\Delta \dot{I}_H$ или напряжения $\Delta \dot{U}_H$ в диагонали нагрузки от изменения измеряемого сопротивления ΔZ определяется уравнениями:

$$\Delta \dot{I}_H = \dot{I}_{\infty} \frac{\lambda}{1+\lambda}; \quad \Delta \dot{U}_H = \dot{U}_{\infty} \frac{\lambda}{1+\lambda};$$

где $\dot{I}_{\infty}$ и $\dot{U}_{\infty}$ — соответственно ток и напряжение в диагонали нагрузки при $\Delta Z \rightarrow \infty$, т. е. при обрыве цепи, содержащей измеряемое сопротивление Z_1 ; $\lambda = \Delta Z/Z_H$, где Z_H — входное сопротивление цепи по отношению к плечу моста, содержащему Z_4 .

В случае мостов постоянного и переменного тока, содержащих только активные сопротивления, рассматриваемые уравнения содержат действительные величины и графически представляют гиперболу. Линеари-

зовать эту зависимость можно путём выбора большого значения Z_{11} по сравнению с ΔZ_{max} . Если мост может быть откалиброван при значении $\Delta Z = \Delta Z_{max}$, то погрешность нелинейности

$$\delta_n \leq - \frac{\Delta Z_{max}}{4Z_{11}} 100\%.$$

Учитывая обозначения, принятые для уравновешенных мостов, можно показать, что для неуравновешенных четырехплечих мостов

$$i_{\infty} = \frac{\dot{E}_{\Pi}}{Z_{10}[(1 + \underline{m} + \underline{K}_{\Pi})\underline{K}_{\Pi} + (1 + \underline{K}_{\Pi})(1 + \underline{n}) + \underline{m}]} = i_{10} \frac{(1 + \underline{m})(1 + \underline{K}_{\Pi})}{(1 + \underline{K}_{\Pi} + \underline{m})\underline{K}_{\Pi} + (1 + \underline{n})(1 + \underline{K}_{\Pi}) + \underline{m}};$$

$$\dot{U}_{\infty} = \frac{\dot{E}_{\Pi}}{\left(1 + \frac{1}{\underline{m}}\right)\left(1 + \frac{\underline{K}_{\Pi}}{1 + \underline{n}}\right)} = \dot{i}_{10} Z_{10} \underline{m} \frac{1 + \underline{K}_{\Pi}}{1 + \frac{\underline{K}_{\Pi}}{1 + \underline{n}}};$$

$$Z_{11} = Z_{10} \frac{(1 + \underline{m})(1 + \underline{n}) \times \times (1 + \underline{K}_{\Pi})(1 + \underline{K}_{\Pi})}{+ (1 + \underline{K}_{\Pi})(1 + \underline{n}) + \underline{m}}.$$

Часто мостовая цепь питается от стабилизированного источника питания с пренебрежимо малым выходным сопротивлением ($Z_{\Pi} = 0$). В этом случае справедливо:

$$i_{\infty} = \frac{\dot{E}_{\Pi}}{Z_{10}[(1 + \underline{n})(1 + \underline{K}_{\Pi}) + \underline{m}]} = \dot{i}_{10} \frac{1 + \underline{m}}{(1 + \underline{n})(1 + \underline{K}_{\Pi})};$$

$$\dot{U}_{\infty} = \frac{\dot{E}_{\Pi}}{1 + \frac{1}{\underline{m}}} = \dot{i}_{10} Z_{10} \underline{m};$$

$$Z_{11} = Z_{10} \frac{(1 + \underline{m})(1 + \underline{n})}{1 + \underline{n} + \frac{\underline{m}}{1 + \underline{K}_{\Pi}}}.$$

5-6. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Измерение мощности в цепях постоянного и переменного тока, в том числе трехфазных, трех- и четырехпроводных производится электродинамическими и ферродина-

мическими ваттметрами. Электродинамические ваттметры имеют классы точности 0,1; 0,2; 0,5; ферродинамические 1,0; 1,5; 2,5. Последние применяются при технических измерениях. Область применения электродинамических ваттметров — цепи постоянного и переменного тока с частотой до нескольких тысяч герц, ферродинамических ваттметров — ограничена цепями промышленной частоты 50 Гц. Измерение мощности на высоких частотах производится электронными ваттметрами. Если ваттметр имеет неградуированную шкалу, что бывает у многодиапазонных ваттметров, то перед его применением высчитывается постоянная ваттметра (цена деления) C_n по формуле

$$C_n = U_n I_n / a_n,$$

где U_n — номинальное напряжение выбранного поддиапазона измерения; I_n — номинальный ток выбранного поддиапазона измерения; a_n — номинальное число делений шкалы ваттметра.

Измерение мощности в цепях постоянного тока

По определению мощность, выделяемая в нагрузку, есть произведение тока нагрузки I на напряжение U на выводах нагрузки:

$$P = UI.$$

Отсюда следует, что мощность может быть измерена путем раздельного измерения напряжения и тока в нагрузке и последующего вычисления. Однако на практике предпочтение отдается одноэлементным электродинамическим ваттметрам. Возможны две схемы включения ваттметра (рис. 5-8): схема на рис. 5-8, а рекомендуется для измерения мощности в высокоомной нагрузке, на рис. 5-8, б — для измерения мощности в низкоомной нагрузке. При включении ваттметра следует обращать внимание на правильность включения генераторных выводов обеих обмоток (генераторные выводы на рис. 5-8 помечены звездочкой).

Измерение активной мощности в цепях переменного тока

Измерение активной мощности в двухпроводной цепи переменного тока производится одним одноэлементным ваттметром, который включается аналогично рис. 5-8. При измерениях в трехфазных цепях также используются одноэлементные ваттметры, но количество приборов может быть разным: один, два или три. В соответствии с этим различают методы одного, двух или трех приборов. Технические измерения в трехфазных цепях производятся обычно посредством специальных двух- или трехэлементных ваттметров. Расширение диапазона измерения производится посредством трансформаторов тока и напряжений.

В случае полностью симметричной трехфазной, трехпроводной цепи (симметрия напряжений, равномерная нагрузка фаз

и одинаковые углы сдвига между векторами токов и напряжений) измерение активной мощности возможно одним прибором, включенным, как показано на рис. 5-9. На рис. 5-9, а показано включение ваттметра в слу-

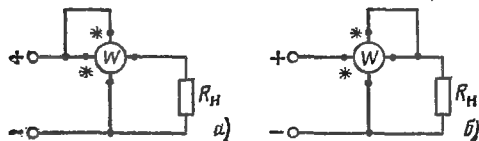


Рис. 5-8. Схемы включения ваттметра.

чае, если средняя точка недоступна. В таком случае искусственная точка создается с помощью двух резисторов, сопротивление которых равно сопротивлению параллельной обмотки ваттметра. Полная мощность трехфазной цепи во всех трех вариантах включения ваттметра определяется по формуле

$$P = 3P_W,$$

где P_W — показание ваттметра.

Измерение активной мощности методом двух приборов

Метод двух приборов предполагает включение двух одноэлементных ваттметров по схеме рис. 5-10. Результат измерения не зависит от схемы соединения и характера нагрузки как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений. По этой же схеме включается и двухэлементный ваттметр.

Сумма показаний обоих ваттметров равна полной мощности трехфазной цепи

$$P = P_{W1} + P_{W2} = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos \varphi.$$

Измерение активной мощности методом трех приборов

Метод трех приборов применяется для измерения активной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи. Схема включения ваттметров показана на рис. 5-11. По этой

же схеме производится включение трехэлементных трехфазных ваттметров.

Полная мощность цепи равна сумме показаний всех ваттметров

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}.$$

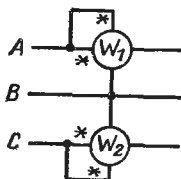


Рис. 5-10. Схема включения двух ваттметров для измерения активной мощности.

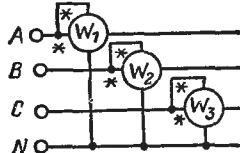


Рис. 5-11. Измерение активной мощности методом трех приборов.

Измерение реактивной мощности

Реактивная мощность в однофазной цепи определяется выражением

$$Q = UI \sin \varphi.$$

В трехфазной цепи реактивная мощность определяется как сумма реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C.$$

В случае полной симметрии цепи

$$Q = 3U_{\text{Ф}} I_{\text{Ф}} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi.$$

Как следует из записанных выражений для измерения реактивной мощности в однофазной цепи требуется обеспечить вращающий момент ваттметра, пропорциональный не $\cos \varphi$, а $\sin \varphi$. Для этой цели применяют специальные схемы, обеспечивающие угол сдвига фазы между током и напряжением в параллельной обмотке, равный 90° . Однако задача измерения реактивной мощности в однофазных цепях встречается крайне редко. Поэтому промышленность специальных ваттметров для этой цепи не выпускает. Измерение реактивной мощности в трехфазных сетях возможно посредством

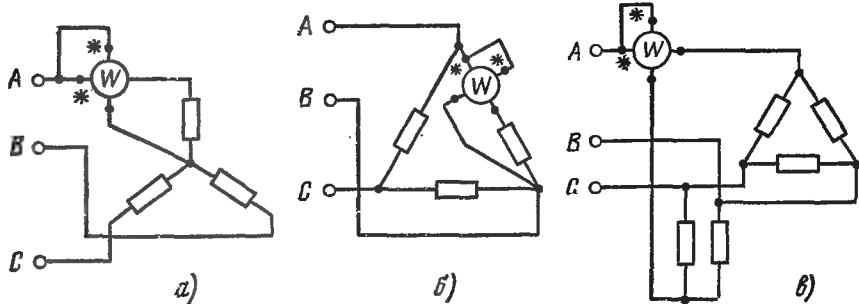


Рис. 5-9. Схемы включения одного ваттметра для измерения активной мощности.

а — для нагрузки вида «звезда»; б — для нагрузки вида «треугольник»; в — для нагрузки с недоступной средней точкой.

ваттметров активной мощности с несущественными изменениями. При этом ваттметры включаются в трехфазную цепь по схеме с замещенными напряжениями. Предполагается, что в трехфазных сетях выполняется условие симметрии напряжений. В противном случае результаты измерения реактивной мощности окажутся не верными.

Расширение пределов измерения реактивной мощности, также как и в случае активной мощности, достигается посредством трансформаторов тока и напряжения.

Измерение реактивной мощности методом одного прибора

Схема включения прибора показана на рис. 5-12. Метод требует в цепи полной симметрии. Показание ваттметра равно

$$P_W = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi.$$

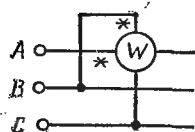


Рис. 5-12. Измерение реактивной мощности одним прибором.

Для получения реактивной мощности всей цепи показание ваттметра следует умножить на $\sqrt{3}$:

$$Q = \sqrt{3} P_W = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi.$$

Данный метод весьма чувствителен к асимметрии токов в трехфазной цепи, которая приводит к значительным погрешностям.

Измерение реактивной мощности методом двух приборов

Схема включения приборов представлена на рис. 5-13. Метод измерения дает правильные результаты как при симметрии, так и при асимметрии токов. Параллельные

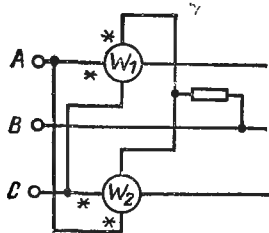


Рис. 5-13. Измерение реактивной мощности двумя приборами.

обмотки ваттметров включаются по схеме с искусственной нулевой точкой, для создания которой используются сопротивления параллельных цепей ваттметров и дополнительный резистор.

Сумма показаний обоих ваттметров

$$P = P_{W1} + P_{W2} = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi.$$

Для получения реактивной мощности всей цепи полученный результат следует умножить на $\sqrt{3}$:

$$Q = \sqrt{3} P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi.$$

Показания ваттметров зависят от значения угла φ .

По этой же схеме включаются двухэлементные ваттметры, выпускаемые промышленностью для целей измерения реактивной мощности в трехфазных трехпроводных цепях. Конструктивно ваттметры не отличаются от двухэлементных ваттметров, а умножение результата измерения на $\sqrt{3}$ учитывается при их градуировке.

Измерение реактивной мощности методом трех приборов

Схема включения приборов представлена на рис. 5-14. Метод применяется для измерения реактивной мощности в трех-

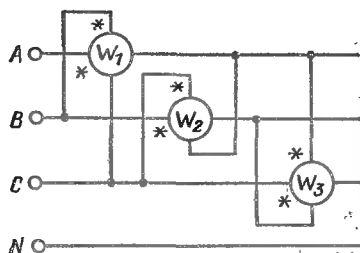


Рис. 5-14. Схема включения трех приборов для измерения реактивной мощности.

фазных четырехпроводных сетях и дает правильные результаты измерения как при симметрии, так и при асимметрии токов. Этот метод может с успехом использоваться и для измерения реактивной мощности в трехфазных трехпроводных цепях в отличие от предыдущего метода, не требуя создания искусственной нулевой точки.

В данном случае сумма показаний всех ваттметров

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = 3 U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi.$$

Чтобы получить значение реактивной мощности трехфазной цепи, сумму показаний ваттметров следует разделить на $\sqrt{3}$:

$$Q = \frac{P}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi.$$

По этой же схеме включаются трехэлементные ваттметры, выпускаемые промышленностью для измерения реактивной мощности в трехфазных четырехпроводных це-

пях. Конструктивно варметр не отличается от трехэлементного ваттметра, а умножение результата измерения на $\sqrt{3}$ учитывается при градуировке варметра.

5-7. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Измерение расхода активной и реактивной электрической энергии в цепях переменного тока для промышленных целей или бытовых нужд производится с помощью индукционных счетчиков переменного тока номинальной частоты 40—60 Гц (ГОСТ 6570-75).

Промышленностью выпускаются электрические счетчики переменного тока следующих типов: СО, СОУ, СА3, СА4, СР3, СР4, СРЗУ, СР4У.

В обозначениях типов счетчиков буквы и цифры означают: С — счетчик; А — активной энергии; Р — реактивной энергии; О — однофазный; 3 или 4 — для трехпроводной или четырехпроводной сети; У — универсальный.

Счетчики активной энергии выпускаются следующих классов точности 0,5; 1,0; 2,0; 2,5. Счетчики реактивной энергии — классов 1,5; 2,0; 3.

У счетчиков должен отсутствовать самоход, т. е. диск счетчика не должен совершать более одного полного оборота при отсутствии тока в последовательной цепи и при напряжении в параллельной цепи 80—110% номинального значения.

По чувствительности к счетчикам предъявляется требование — диск счетчика должен начать и продолжать непрерывно вращаться при номинальном напряжении, $\cos \varphi = 1$ ($\sin \varphi = 1$) и токе не более 0,4% номинального — для счетчиков класса точности 0,5; 0,5% номинального — для счетчиков классов точности 1,0; 1,5 и 2,5; 1% номинального — для счетчиков классов 2,5 и 3,0.

Генераторные зажимы токовых обмоток счетчиков обозначаются буквой Г, зажимы обмоток напряжения счетчиков, предназначенных для включения в трехфазные трех- и четырехпроводные сети — цифрами 1, 2, 3 и 0.

Трансформаторные счетчики подключаются через трансформаторы тока и напряжения с определенным коэффициентом трансформации.

Универсальные счетчики подключаются через трансформаторы тока и напряжения с любыми коэффициентами трансформации, но определенным номинальным вторичным током и напряжением.

Схемы включения счетчиков как активной, так и реактивной энергии аналогичны схемам включения ваттметров активной и реактивной мощности соответственно.

Вопросы учета электроэнергии в электроустановках регламентируются гл. 1-5 правил устройства электроустановок.

5-8. МОСТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Мосты постоянного и переменного тока делятся на мосты с ручной наводкой на равновесие и цифровые мосты.

Мосты постоянного тока с ручной наводкой на равновесие. Мосты постоянного тока выпускаются 14 типов с различным назначением, пределами измерения, классами точности [5-4].

Мосты типов Р369, Р329, Р316, Р4053, Р4060, МО-70, МОД-61, Р39 предназначены для измерения сопротивлений электрической цепи на постоянном токе. Диапазон измеряемых сопротивлений 10^{-8} — 10^{15} Ом, зависит от типа моста.

Мост типа КМ-61С предназначен для измерения параметров и определения мест повреждения линии связи.

Мост типа Р333 предназначен для измерения сопротивлений по схеме одинарного моста, определения места повреждения кабеля посредством петли Варлея, Муррея, для измерения асимметрии проводов, для использования моста как магазина сопротивлений.

Мост типа МО-62 предназначен для измерения электрических сопротивлений в цепях постоянного тока, проверки измерительных приборов и устройств к термометрам сопротивления и измерения сопротивления изоляции в пределах 1—100 МОм.

Кабельный мост типа Р334 предназначен для измерения сопротивления на постоянном токе по схеме одинарного моста, определения места повреждения кабеля на постоянном токе, измерения асимметрии проводов, измерения сопротивления изоляции, определения места обрыва в кабеле измерением емкости и измерения емкости обмоток силовых трансформаторов и кабелей.

Мосты типа ММВ предназначены для измерения сопротивления проводников постоянному току.

Мосты реохордные типа Р38 предназначены для измерения сопротивлений электролитов на переменном токе и сопротивления твердых проводников на постоянном токе.

Цифровые мосты и омметры постоянного тока. Цифровые мосты и омметры постоянного тока предназначены для измерения сопротивления электрической цепи и отклонения сопротивления от установленного номинального значения. Диапазон измеряемых сопротивлений 10^{-3} — 10^{10} Ом, основная погрешность 0,02—1%, время измерения 0,2—2 с.

Для измерения абсолютного значения сопротивления выпускаются модели Ц34, Р380, Р383, Р382. Модель Р382 позволяет измерять и отклонение сопротивления от заданного номинального значения. Для измерения отклонения сопротивления от заданного значения выпускаются процентные мосты моделей Ц30—04.1; Р337; Ф4206 и

Ф4205.1. Для контроля допуска сопротивления резистора от номинала выпускается контролер допусковый типа Ф4210.

Цифровой мост модели Щ34 предназначен для измерения сопротивлений в диапазоне 10^{-3} — 10^9 Ом; время измерения 1 с; выбор поддиапазонов автоматический; габариты $500 \times 400 \times 200$; масса 15 кг. Основная погрешность моста зависит от поддиапазона измерения: $0,1 + 0,01 R_k/R_x$ для поддиапазонов 10^{-3} — 10^3 Ом и 10^5 — 10^7 Ом; $0,02 + 0,005 R_k/R_x$ для поддиапазона 10^3 — 10^5 Ом; $1,0 + 0,1 R_k/R_x$ для поддиапазона 10^7 — 10^9 Ом. Ориентировочная цена 2700 руб.

С характеристиками других мостов можно ознакомиться в [5-4].

Мосты переменного тока с ручной наводкой на равновесие. Мосты переменного тока моделей Р571М, Р577, Р5026 предназначены для измерения емкости C , индуктивности L , тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ и добротности Q . Модель Р595 — для измерения C и $\operatorname{tg} \delta$ при профилактике сетей высокого напряжения. Модель Р525 — для измерения $\operatorname{tg} \delta$ и C твердых и жидких электроизоляционных материалов. Модель Р568 — для измерения $\operatorname{tg} \delta$ и C при исследовании закономерностей электрохимических и полимеризационных реакций различных органических соединений. Модель Р5021 — для исследования электрохимических систем. С характеристиками мостов можно ознакомиться в [5-4].

Цифровые мосты переменного тока. Предназначены для измерения емкости C , тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$, индуктивности L , сопротивления потерь R_p , активного сопротивления R и постоянной времени τ .

Цифровые мосты переменного тока выпускаются следующих типов: Р589, Р591, Р5010, с питанием от сети $220 \text{ В} \pm 10\%$, $50 \text{ Гц} \pm 1\%$.

Мост типа Р5010 предназначен для измерения C , $\operatorname{tg} \delta$, L , R_p , R и τ . Число знаков отсчета 4. Диапазон измеряемых емкостей от 0,1 пФ до 99,99 мкФ; $\operatorname{tg} \delta$ от 0 до 0,5; индуктивностей от 1 мкГн до 9,999 Гн; R_p от 0 до 40,00 кОм (в зависимости от поддиапазона измерения); сопротивления R от 100 мОм до 999,9 кОм. Диапазоны измеряемых величин разбиты на семь поддиапазонов. Погрешность измерения зависит от выбранного поддиапазона, ее минимальное значение 0,5% для C , L , R_p и $R \pm (0,02 \operatorname{tg} \delta + 2 \cdot 10^{-3})$ для $\operatorname{tg} \delta$. Рабочая частота моста 1000 Гц. Время измерения не более 0,3 с. Габаритные размеры $540 \times 480 \times 220$ мм; масса не более 20 кг. Цена 2275 руб.

5-9. КОМПЕНСАТОРЫ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Потенциометры постоянного тока выпускаются следующих типов Р332, Р345, Р377, Р379, Р348, Р309, Р363, Р364, Р37-1, ПП-70 [5-4]. Потенциометр переменного тока типа Р56/2.

Потенциометры постоянного тока предназначены для измерения ЭДС, напряжений и совместно с образцовыми резисторами для измерения токов и сопротивлений.

Потенциометр постоянного тока типа Р309 предназначен для измерения напряжений, не превышающих 2,12110 В. Класс точности 0,005. Цена деления нулевого прибора $2 \cdot 10^{-8}$ В. Расширение пределов измерения до 1000 В производится посредством делителя напряжения типа Р35 класса точности 0,005 с коэффициентом деления 0,1; 0,01; 0,001; при полном сопротивлении 10 МОм. Прибор состоит из четырех узлов: потенциометра типа Р309 (габаритные размеры $550 \times 410 \times 300$ мм; масса 25 кг), переключателя типа П309 (габаритные размеры $300 \times 200 \times 180$; масса 5 кг), усилителя типа ФЗР5.2 (габаритные размеры $345 \times 285 \times 225$ мм; масса 9 кг) и делителя типа Р35 (габаритные размеры $300 \times 150 \times 150$ мм; масса 3 кг). Цена 2000 руб.

Потенциометр переменного тока типа Р56/2, предназначен для измерения ЭДС, напряжений, фазовых углов. Пределы измерения составляющих по каждой оси координат от 0 до 0,16 В и от 0 до 1,6 В. Класс точности прибора 0,1. Номинальная частота 40—60 Гц. Габаритные размеры $640 \times 440 \times 265$ мм; масса 60 кг. Цена 400 руб.

5-10. ЦИФРОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цифровые вольтметры постоянного тока охватывают диапазон измеряемых напряжений от 1 мкВ до 1000 В, обладают малой погрешностью 0,01—0,1%, большим входным сопротивлением до 1000 МОм, высоким быстродействием от 2 до 500 измерений в секунду, снабжены специальными фильтрами для подавления промышленных помех и выходом на цифропечатающее или обрабатывающее результаты измерения устройство в коде 8—4—2—1 (исключение представляет модель Щ1513, код которой 2—4—2—1).

Диапазоны измеряемых напряжений разбиваются на ряд поддиапазонов. Выбор нужного поддиапазона обычно ручной, но в некоторых моделях (Щ1516, В2-22) предусмотрен, помимо ручного, автоматический и дистанционный выбор поддиапазона измерения.

Полярность измеряемого напряжения всегда выбирается автоматически и указывается на отсчетном устройстве.

Вольтметры интегрирующего типа обладают более высокой помехоустойчивостью, но уступают по быстродействию вольтметрам других типов в случае измерения напряжений при отсутствии помех. Если же флюктуационные помехи присутствуют и борьба с ними требует включения фильтров, то быстродействие интегрирующих вольтметров оказывается выше быстро-

Таблица 5-6

Характеристики цифровых вольтметров постоянного тока интегрирующего типа

Модель	Поддиапазон измерения, В	Класс точности	Число знаков отсчета	Р. С., мкВ	Входное сопротивление, МОм	$K_{O, в}$, дБ		$K_{н, в}$, дБ		Время измерения, с		Габаритные размеры, мм	Масса, кг
						=	~	без Ф	с Ф	без Ф	с Ф		
Ц168002	0—0,120000	0,03/0,005	6	1	1000	130	120	60	—	0,25	—	480×118× ×420	1
	0—1,20000	0,03/0,005			1000								
	0—12,0000	0,03/0,005			10								
	0—120,000	0,05/0,005			10								
	0—1000	0,05/0,005			10								
Ц1413	0—0,19999	0,05/0,02	5	10	1000	100	80	60	80	0,3	2	317×150× ×285	8
	0—1,9999	0,05/0,02			1000								
	0—19,999	0,05/0,02			1000								
	0—199,99	0,06/0,02			10								
	0—1000	0,06/0,02			10								

Обозначения: Р.С. — разрешающая способность; $K_{O, в}$ — коэффициент подавления помех общего вида на постоянном (=) и переменном (~) токе частоты 50 Гц; $K_{н, в}$ — коэффициент подавления помех нормального вида; Ф — фильтр.

Таблица 5-7

Характеристики щитовых цифровых вольтметров постоянного тока

Модель вольт- метра	Диапазон измере- ния, В	Основная приведен- ная по- грешность, %	Входное сопротив- ление, МОм	Время одного измерения, с		K _{н, в} , дБ		Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Цена, руб.
				без Ф	с Ф	без Ф	с Ф			
Ф200/1 Ф200/2 Ф200/3	0—9,99 0—99,9 0—999	±0,5	0,1 0,02 0,2	0,3—1	10	—	40	Вольтметра 200×80×305; добавочного устройства 210×80×74	5	270
Ф203	0—1 0—10 0—100	±0,2	10 1 1	2·10 ⁻⁴	—	—	—	200×80×305	0,5	1700
Ф204/1 Ф204/2 Ф204/3 Ф204/4	0—0,999 0—9,99 0—99,9 0—999	±0,3	40 40 1 40	0,3—1	10	—	40	100×200×320	—	375

Обозначения: $K_{н, в}$ — коэффициент подавления помех нормального вида; Ф — фильтр.

действия вольтметров других типов. Поэтому при выборе типа цифрового вольтметра предпочтение следует отдавать интегрирующим вольтметрам.

Питание цифровых вольтметров производится от сетевого напряжения 220 В ± ±10%, частоты 50 ± 1 Гц.

Характеристики некоторых моделей цифровых вольтметров представлены в табл. 5-6, 5-7. Цена модели Ц1413 2250 руб.

Цифровые вольтметры переменного тока типов Ф485, Ф486 и Ф220. Вольтметры типов Ф485 и Ф486 предназначены для измерения действующего значения переменного напряжения синусоидальной и несинусоидальной формы кривой в звуковом диапазоне частот и различаются только классом точности — основная приведенная погрешность на всех поддиапазонах Ф485 не превышает ±0,2%, а Ф486 — ±0,5%. Остальные характеристики у обоих моделей совпадают.

Диапазон измерения 10 мВ — 1000 В разбит на пять поддиапазонов: 0,1; 1; 10; 100 и 1000 В. Диапазон рабочих частот для поддиапазонов 0,1; 1; 10 и 100 В — от 45 Гц до 20 000 Гц, для поддиапазона 1000 В — от 45 до 400 Гц. Допустимое значение отношения амплитуды к действующему значению для поддиапазонов 0,1; 1; 10 и 100 В не более 4. На поддиапазоне 1000 В вольтметры измеряют только синусоидальное напряжение.

Входное сопротивление на поддиапазонах: 0,1 В — 10 МОм; 1 В — 100 кОм; 10 и 100 В — 1 МОм; 1000 В — 10 МОм. Входная емкость на всех поддиапазонах не более 100 пФ.

Время измерения не более 6 с при ручном выборе поддиапазонов и не более 8 с — при автоматическом.

Результат измерения может быть передан во внешние устройства в коде 8—4—2—1.

Питание прибора от сети $220 \text{ В} \pm 10\%$, $50 \pm 1 \text{ Гц}$.

Габаритные размеры $480 \times 470 \times 136 \text{ мм}$; масса 20 кг .

Цифровые вольтметры типа Ф220 предназначены для измерения напряжения в цепях переменного тока и состоят из двух блоков: измерительного и преобразователя измеряемого напряжения в постоянное. В качестве измерительного блока используется цифровой вольтметр модели Ф200. Модель Ф220 имеет пять модификаций, различающихся диапазоном измерения и диапазоном рабочих частот:

Модификация	Ф220/1	Ф220/2	Ф220/3	Ф220/4	Ф220/5
Диапазон измерения, В	0,1—0,999	1—9,99	10—99	50—499	100—999
Частотный диапазон, Гц	40—5000	40—5000	40—5000	45—55	45—55

Границы основной приведенной погрешности измерения $\pm 1\%$. Время измерения 5 с . Входное сопротивление 100 кОм . Масса не более 4 кг . Цена 300 руб .

Остальные характеристики приборов, а также внешнее конструктивное оформление, аналогичное характеристикам и конструктивному оформлению вольтметров типа Ф200.

5-11. КОМБИНИРОВАННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ

Комбинированные цифровые приборы предназначены для измерения нескольких электрических величин. Результат измерения индицируется на цифровом отсчетном устройстве и выдается во внешние устройства кодом 8—4—2—1. Питание приборов типов Ф30 и Ц382 производится от сети напряжением $220 \text{ В} \pm 10\%$, частоты $50 \pm 1 \text{ Гц}$, для приборов других типов допуск на напряжение сети расширен: $+10\%$, -15% .

Ампервольтметр типа Ц387 предназначен для измерения постоянных напряжений и токов, а также сопротивления постоянному току.

Диапазон измеряемых напряжений от 0 до 1000 В разбит на поддиапазоны $0,16; 1,6; 16; 160$ и 100 В . Цена деления на нижнем поддиапазоне 10 мкВ . Класс точности и входное сопротивление на поддиапазонах соответственно $0,16 \text{ В} — 0,08/0,02$, 500 МОм ; $1,6 \text{ МОм} \pm 0,1\%$. Время установления показаний от $0,2$ до $0,5 \text{ с}$.

Диапазон измеряемых токов от 0 до 1 А разбит на поддиапазоны $0,16; 1,6; 16; 160$ и 1000 мА . Класс точности на всех поддиапазонах $0,14/0,04$. Время установления показаний $0,2 \text{ с}$.

Диапазон измеряемых сопротивлений от 0 до 10 МОм разбит на поддиапазоны: $0,1; 1; 10; 100; 1000$ и $10\,000 \text{ кОм}$. Класс точности на всех поддиапазонах $0,14/0,04$, время установления показаний от $0,15$ до 1 с .

Подавление помех общего вида на постоянном токе — не менее 100 дБ , на переменном токе частоты 50 Гц — не менее 80 дБ , помех нормального вида частоты 50 Гц — не менее 60 дБ .

Габаритные размеры прибора $440 \times 395 \times 150 \text{ мм}$; масса 13 кг .

Универсальный прибор типа Ф4800 предназначен для измерения постоянных токов I и напряжений U , емкости C конденсаторов с твердым диэлектриком, индуктивности L катушек без магнитопроводов, сопротивления постоянному току R , средней частоты колебаний и следования импульсов f , процентного отклонения промышленной частоты от номинального значения Δf , интервала времени между двумя импульсами t , а также счета числа импульсов n .

Измеряемые параметры, диапазоны и поддиапазоны измерения, а также погрешности измерения представлены в табл. 5-8.

Поддиапазоны измерения U , I , C , L , R выбираются вручную, для остальных параметров устанавливаются автоматически.

Добротность катушек индуктивности Q и тангенс угла потерь конденсаторов $\text{tg } \delta$ измеряются на частоте 50 Гц .

При измерении f , t и n входные импульсы должны иметь амплитуду от 1 до 60 В , длительность не менее $0,5 \text{ мкс}$ и фронт не более $0,1 \text{ мкс}$. При измерении f синусоидальных колебаний действующее напряжение должно быть от 2 до 60 В .

Погрешность измерения процентного отклонения частоты $\pm 10\%$ обеспечивается при входном эффективном напряжении $+60 \text{ В}$.

Входное сопротивление: при измерении U 1 МОм , при измерении f , t и n 10 кОм ; входная емкость не более 100 пФ ; при измерении I — не более 1 кОм .

Время измерения всех величин, кроме сопротивлений, не более $0,2 \text{ с}$; время измерения сопротивления не более 10 с .

Габаритные размеры $496 \times 380 \times 135 \text{ мм}$; масса 12 кг . Цена 3000 руб .

Вольтметры и амперметры типов Ф2000, Ф2001, Ф2002, Ф2003 предназначены для измерения постоянных токов и напряжений.

По виду измеряемой величины, диапазонами измерения и конструктивному исполнению приборы делятся на модификации. Однопредельные вольтметры типа Ф2000 имеют модификации Ф2000/1, Ф2000/2, Ф2000/3, Ф2000/4 и Ф2000/5 с диапазонами измерения соответственно $0,1; 1; 10; 100$ и 1000 В ; конструктивно выполнены в виде частичных вставных блоков АСЭТ.

Многопредельные вольтметры Ф2001 и Ф2002 имеют поддиапазоны измерения $0,1; 1; 10; 100$ и 1000 В . Переключение поддиапазонов ручное и дистанционное. Вольтметр Ф2001 конструктивно выполнен в виде частично приборного блока АСЭТ, а Ф2002 — в виде частичного вставного блока АСЭТ.

Амперметры Ф2003 предназначены для измерения тока в пределах $0—7500 \text{ А}$, имеют две модификации Ф2003/1 и Ф2003/2. Первая модификация комплектуется калибро-

Т а б л и ц а 5-8

Характеристики прибора типа Ф4800

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Поддиапазоны измерения	Класс точности
Напряжение	0,001—1000 В	1; 10; 1000 В	0,35/0,1
Ток	0,1—1000 мА	1; 10; 100; 1000 мА	0,35/0,1 0,7/0,2
Емкость	10 нФ — 100 мкФ при $\operatorname{tg} \delta < 0,02$	100 нФ; 1; 10 мкФ	0,35/0,1
	10 — 100 мкФ при $\operatorname{tg} \delta < 0,03$	100 мкФ	0,7/0,2
	1 нФ — 10 мкФ при $\operatorname{tg} \delta < 0,02$	0,1; 1; 10; 100 мкФ	0,35/0,1
Индуктивность	0,01—1 Гн	1; 10 Гн	0,45/0,2
Сопротивление	10 Ом — 1 МОм	0,1; 1; 10; 100; 1000 кОм	0,35/0,1
Частота	1 — 1000 кГц	10; 100; 1000 кГц	0,03/0,01
Интервал времени	1 мс — 1000 с	0,01, 0,1; 1; 10; 100; 1000 с	0,07/0,02
Отклонение частоты	$-10\% \div +10\%$	10%	$\pm \left(0,1 + \frac{\Delta f}{100} \right)$
Число импульсов	1—10 ⁹	10 ⁴ ; 10 ⁵ ; 10 ⁶ ; 10 ⁷ ; 10 ⁸ ; 10 ⁹	± 1 импульс

ванным шунтом на 60 мВ, вторая — на 75 мВ. Обе модификации выполнены в виде частичных вставных блоков АСЭТ.

Класс точности всех приборов 0,3/0,1. Входное сопротивление вольтметров на поддиапазоне 0,1 В не менее 6 МОм, на поддиапазоне 1 В — не менее 1 МОм, на остальных поддиапазонах 10 МОм. Время одного измерения 40 мс. Подавление помех нормального вида частоты 50 и 100 Гц не менее 60 дБ.

Габаритные размеры 101×237×315 мм; масса 4 кг. Цена 1500 руб.

5-12. ЩИТОВЫЕ АНАЛОГОВЫЕ ПРИБОРЫ

Общие сведения

Щитовые приборы изготавливаются для измерения 18 электрических величин, применяются как в лабораторных и цеховых усло-

виях, так и в широком диапазоне изменений внешних условий. Этим объясняется большое разнообразие конструкций приборов. Ниже приводятся общие сведения о щитовых аналоговых приборах. Более подробную информацию по данной группе приборов можно найти в [5-4].

В основу конструкции щитовых аналоговых приборов наиболее часто закладываются системы: магнитоэлектрическая, электромагнитная, ферродинамическая, индукционная, детекторная и термоэлектрическая.

В зависимости от расположения измерительного механизма по отношению к корпусу прибора и размеров лицевой части приборы делятся на группы (рис. 5-15).

Приборы с расположением измерительного механизма в центре одной из сторон и углом отклонения указателя более 100° (рис. 5-15, б) называют панорамными. Приборы с расположением измерительного механизма в углу (рис. 5-15, в) имеют угол

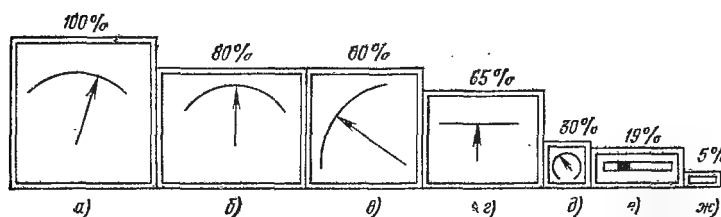


Рис. 5-15. Расположение измерительного механизма по отношению к лицевой части прибора.

Т а б л и ц а 5-9

Габаритные размеры приборов

Характеристика прибора	Прибор			
	миниатюрный	малого габарита	среднего габарита	большого габарита
Наибольший размер линейной части, мм	50	50—100	100—200	Свыше 200
Габаритные размеры, мм	От 20×20×37 или 21×18×28 до 46×47×79	От 30,5×65,5×83 до 100×100×115	От 20×105×80 до 175×160×110	От 144×226×136 до 450×490×120

Т а б л и ц а 5-10

Предельные возможности измерения щитовыми приборами

Измеряемая величина	Предел измерения, класс точности	Единица	Прибор			
			миниатюрный	малого габарита	среднего габарита	большого габарита
Ток постоянный	Нижний	мкА	10	5	0,5	0,2
	Верхний:	А	10	20	50	20
	прямое включение с наружным шунтом	кА	6,0	7,5	7,5	7,5
	с трансформатором постоянного тока	кА	—	—	150	70
	Класс точности	—	2,5	1,5	0,5	0,5
Ток переменный частотой 50 Гц	Нижний	мкА	—	25	25	5
	Верхний:	А	—	50	300	20
	прямое включение с трансформатором тока	кА	—	6	75	6
	Класс точности	—	—	1,5	1,0	1,5
Ток переменный	Нижний	мкА	25·10 ⁶	25	1500	5·10 ⁶
	Верхний:	А	—	50	200	20
	прямое включение с трансформатором тока	кА	0,3	6	6	6
	Максимальная частота	Гц	1200	75·10 ⁶	75·10 ⁶	500
	Инфранизкая частота	Гц	—	—	0,25—1,5	—
	Класс точности	—	2,5	1,5	1,5	1,5
Отношение токов	Отношение	А	—	1,5	—	—
	Номинальные токи	%	—	1—1,5	—	—
	Основная погрешность	—	—	4	—	—
Напряжение постоянное	Нижний	мВ	45	10	0,5	0,5
	Верхний:	В	600	600	1500	500
	прямое включение с добавочным сопротивлением	кВ	3	20	20	—
	Класс точности	—	2,5	1,5	0,5	0,5
Напряжение переменное частотой 50 Гц	Нижний	В	30	0,5	0,5	30
	Верхний:	В	250	6000	3000	450
	прямое включение с трансформатором напряжения	кВ	—	7,5	600	30
	Класс точности	—	1,5	1,0	1,0	1,5
Напряжение переменное	Нижний	В	45	0,5	0,5	30
	Верхний:	В	250	600	3000	450
	прямое включение с трансформатором напряжения	кВ	—	7,5	450	—
	Максимальная частота	Гц	1200	10 000	2·10 ⁷	10 000
	Инфранизкая частота	Гц	—	—	0,25—1,5	—
	Класс точности	—	2,0	1,0	1,0	1,5

Продолжение табл. 5-10

Измеряемая величина	Предел измерения, класс точности	Единица	Прибор			
			мни- тюрный	малого габарита	среднего габарита	большо- го габарита
Сопrotивление изо- ляции	Нижний Верхний Класс точности	МОм МОм —	— — —	1,0 5,0 2,5	1,0 20 1,5	— — —
Мощность постоян- ного тока	Номинальный ток Напряжение: нижний верхний Класс точности	А В В —	— — — —	— — — —	2000 50 1200 2,5	— — — —
Активная мощ- ность однофазного тока*	Номинальный ток: нижний верхний с трансформатором то- ка Номинальное напряжение: нижний верхний с трансформатором на- пряжения Класс точности	А А кА В В кВ —	— — — — — — —	— — — — — — —	1 5 15 127 220 380 1,5	— — — — — — —
Активная мощ- ность трехфазного тока трехпроводной сети	Номинальный ток: нижний верхний с трансформатором тока Номинальное напряжение: нижний верхний с трансформатором на- пряжения Класс точности	А А кА В В кВ —	— — — — — — —	1 5 4 127 380 0,38 2,5	1 5 40 127 380 500 1,5	— — — — — — —
Активная мощ- ность трехфазного тока четырехпро- водной сети	Номинальный ток: нижний верхний с трансформатором то- ка Номинальное напряжение: нижний верхний Класс точности	А А кА В В —	— — — — — —	— — — — — —	1 5 15 220 380 2,5	— — — — — —
Реактивная мощ- ность трехфазного то- ка	Номинальный ток: нижний верхний с трансформатором то- ка Номинальное напряжение: нижний верхний с трансформатором на- пряжения Класс точности	А А кА В В кВ —	— — — — — — —	— — — — — — —	1 5 15 127 380 500 2,5	— — — — — — —
Частота перемен- ного тока	Нижний Верхний Класс точности	Гц Гц —	350—450 350—900 4,0	48—52 45—2600 1,0	5—60 45—550 2,5	— — —
Количество элект- ричества	Нижний Верхний Основная погрешность	мКл мКл %	— — —	— — —	30 150 5	— — —

* Имеется ваттметр инфранизкой частоты среднего габарита.

отклонения указателя 90° и называются квадратными. Приборы с зашкальным расположением измерительного механизма, ось которого параллельна плоскости шкалы, и с отсчетом по стрелке (рис. 5-15, а) называют профильными; с отсчетом по световому пятну (рис. 5-15, е) — узкопрофильными; с подвижной шкалой, проектируемой на небольшой экран (рис. 5-15, ж) — проекционными. Приборы с центральным расположением измерительного механизма и углом отклонения указателя более 230° (рис. 5-15, д) называют круглошкальными.

В зависимости от размеров лицевой части приборы делятся на миниатюрные, а также малого, среднего и большого габарита (табл. 5-9).

Предельные возможности измерения щитовыми приборами различных величин представлены в табл. 5-10 (прочерки указывают на отсутствие приборов для измерения данной величины) [5-4]. Указанная в таблице точность является предельной для данного габаритного размера прибора.

При выборе размеров прибора руководствуются удобством и точностью отсчета. Последняя определяется минимальным перемещением указателя (стрелки), которое можно уверенно заметить глазом. Необходимо, чтобы это перемещение было в 3—4 раза меньше абсолютного значения допустимой погрешности. Заметное глазом отклонение указателя определяется углом зрения. Последний должен быть не менее $2'$. Исходя от заданного расстояния до шкалы, можно определить минимальное заметное для глаза отклонение, затем, увеличив его в 3—4 раза, получить абсолютное значение основной погрешности. Таким образом, следует выбирать класс прибора, длину его шкалы и габариты.

На практике измерительные задачи наиболее часто решаются с помощью приборов малого и среднего габаритов. Ниже приводятся характеристики некоторых типов таких приборов. С характеристиками приборов других типов можно ознакомиться в [5-4].

Приборы малого габарита

Макроамперметры типа M2003 магнитоэлектрической системы предназначены для измерения постоянного тока. Характеристики приборов представлены в табл. 5-11.

Время успокоения подвижной части не более 4 с. Рабочее положение приборов — вертикальное и горизонтальное.

Длина шкалы 70 мм.

Приборы выполнены в корпусе из терморезистивной пластмассы. Габаритные размеры $80 \times 80 \times 55$ мм; масса 0,35 кг. Минимальная вероятность безотказной работы за 500 ч испытаний не менее 0,8 при доверительной вероятности 0,8. Ориентировочная цена 5 руб. 70 коп.

Таблица 5-11

Характеристики приборов типа M2003 с классами точности 1,5 и 2,5

Рабочий диапазон измерения, мкА	Внутреннее сопротивление, Ом, не более	Рабочий диапазон измерения, мкА	Внутреннее сопротивление, Ом, не более
0—50	3000	50—0—50	3000
0—100	900	100—0—100	900
0—200	900	200—0—200	900
0—300	500	300—0—300	500
0—500	500	500—0—500	500
0—1000	500	1000—0—	500
25—0—25	3000*	1000	

* Только при классе точности 1,5.

Милливольтметры типа M4211 и M4212 магнитоэлектрической системы предназначены для измерения постоянного напряжения. Пределы измерения M4211: 45, 75, 150, 300, 600, 750 и 1000 мВ; M4212 с симметричной двусторонней или односторонней шкалой: 25—0—25 (0—25), 45—0—45 (0—45), 75—0—75 (0—75), 150—0—150 (0—150), 300—0—300 (0—300), 500—0—500 (0—500), 750—0—750 (0—750), 1000—0—1000 (0—1000) мВ. Ток, соответствующий конечному значению шкалы, 3 мА. Включение приборов производится калиброванными проводниками. Классы точности 1,5 — прибора M4211; 2,5 и 4,0 прибора M4212. Время успокоения подвижной части 4 с. Рабочее положение — вертикальное и горизонтальное. Габаритные размеры прибора M4211 $60 \times 60 \times 46$ мм; масса 0,15 кг; прибора M4212 $40 \times 40 \times 50$ мм, масса 0,125 кг. Ориентировочная цена M4211 — 5 руб. 50 коп., M4212 — 5 руб. 80 коп.

Миллиамперметры, амперметры, килоамперметры, вольтметры, киловольтметры и вольтамперметры типа M2001 магнитоэлектрической системы предназначены для измерения постоянных токов и напряжений. Основные параметры вольтметров представлены в табл. 5-12, амперметров в табл. 5-13. Класс точности приборов 2,5. Время успокоения подвижной части не более 4 с. Рабочее положение — горизонтальное и вертикальное. Габаритные размеры прибора $60 \times 60 \times 68$ мм, а вольтметра с пределами измерения от 1,5 до 450 В $60 \times 60 \times 70$ мм. Габаритные размеры добавочных сопротивлений и шунтов типа P105 $25,5 \times 29,5 \times 31$ мм, масса 0,02 кг; добавочного сопротивления типа P103 $210 \times 80 \times 94$ мм, масса 0,65 кг; добавочного сопротивления типа P102 $110 \times 80 \times 94$ мм, масса 0,23 кг. Цена 4 руб.

Вольтметры типа M2001 имеют конечные значения шкалы при непосредственном включении: 1,5; 3; 6,5; 15; 30; 50; 75; 150; 250 и 300 В; при включении с добавочным резистором ДС на 1 мА: 600; 1000; 1500 и 3000 В при сопротивлениях ДС: 0,6; 1,0; 1,5 и 3,0 МОм соответственно. На те же конечные значения выпускаются вольтметры с симметричной двусторонней шкалой.

Амперметры типа М2001 выпускаются при непосредственном включении на токи 1; 5; 10; 30; 50; 100; 150; 300; 500 мА и 1; 3; 10 А. При этом падение напряжения на приборах 50 мА и выше не более 90 мВ. С шунтами на 75 мВ приборы имеют конечные значения 20; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 500; 750 А и 1; 1,5; 4; 6 и 7,5 кА. При этом приборы имеют падение напряжения 75 мВ при токе, соответствующем конечному значению. На те же конечные значения выпускаются амперметры с симметричной двусторонней шкалой.

Приборы типа Э140 и Э140/1 электромагнитной системы предназначены для измерения переменных токов и напряжений в диапазоне температур $-40 \div +60^\circ\text{C}$ и относительной влажности до 98% (при 60°C), тряско-вибро-ударопрочные. Пределы измерения и рабочая область частот приборов представлены в табл. 5-12. Классы точности 2,5 для Э140; 1,5 для Э140/1.

Таблица 5-12

Примеры измерения и рабочая область частот приборов Э140, Э140/1

Тип прибора	Предел измерения	Частота, Гц	Включение прибора
Э140	100, 250, 300, 500 мА; 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 А	50—500	Непосредственное
	5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 750 А; 1, 1,5; 2, 3, 4, 5, 6 кА	50	Через трансформатор тока на 5 А
	10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200 А	400—500	Через трансформатор тока на 1 А
	15, 30, 50, 150, 250, 450 В	50 400—500	Непосредственное
Э140/1	140, 250, 450 А	50 400; 500	Непосредственное

Время успокоения не более 3 с. В приборах типа Э140 шкала практически равномерная в пределах 25—100% конечного значения; типа Э140/1 — диапазон измерений от 65 до 100% конечного значения растянут на 75% длины шкалы. Отклонение температуры на каждые 10°C приводит к изменению показаний не более $\pm 0,5\%$ — для амперметров, $\pm 0,8\%$ — для вольтметров типа Э140/1 и $\pm 1\%$ — для приборов типа Э140. Изменение частоты на $\pm 10\%$ номинальной приводит к изменению показаний до $\pm 1\%$ для амперметров и не превышает основной погрешности для вольтметров; внешние магнитные поля напряженностью 400 А/м приводят к изменению показаний

не более $\pm 2,5\%$; отклонение прибора на 45° от вертикального положения изменяет показание не более 1% длины диапазона измерений. Габаритные размеры приборов 85×85×80 мм; масса 0,55 кг. Цена Э140 — 3 руб., Э140/1 — 10 руб.

Киловаттметры типа Д8003 предназначены для измерения активной мощности в трехфазных трехпроводных сетях частотой 50 Гц с равномерной и неравномерной нагрузкой фаз, в диапазоне температур от -50 до $+60^\circ\text{C}$ и относительной влажности до 95% (при 35°C) тряскопрочный, виброустойчивый. Класс точности 2,5. Конечные значения диапазонов измерения представлены в табл. 5-13.

Таблица 5-13

Характеристики киловаттметра типа Д8003

Диапазон измерения, кВт	Ток при номинальном напряжении, В		Диапазон измерения, кВт	Ток при номинальном напряжении, В	
	220	380		220	380
2—0—6	20/5	10/5	20—0—80	300/5	150/5
2—0—3	30/5	15/5	25—0—100	300/5	200/5
4—0—12	40/5	20/5	40—0—120	400/5	200/5
5—0—15	50/5	30/5	50—0—150	—	300/5
10—0—30	100/5	50/5	100—0—300	1000/5	600/5
10—0—40	150/5	75/5	100—0—400	1500/5	750/5
20—0—60	200/5	100/5	200—0—600	2000/5	1000/5

Последовательные цепи ваттметра включаются и сеть через трансформаторы тока, параллельные — через добавочные резисторы типа Р84. Потребляемая мощность последовательной цепи прибора 3 В·А, параллельной 4 В·А. Время успокоения подвижной части 4 с. Отклонение окружающей температуры от нормальной (в пределах рабочих температур) на каждые 10°C приводит к изменению показаний прибора не более $\pm 1,2\%$. Внешнее магнитное поле напряженностью 400 А/м, а также изменение частоты от номинального значения на $\pm 10\%$ и напряжения на $\pm 20\%$ номинального значения вызывает изменение показаний прибора не более $\pm 2,5\%$. Габаритные размеры ваттметра 80×80×70 мм, добавочного сопротивления 110×80×50 мм; масса ваттметра с добавочным сопротивлением не более 0,6 кг. Цена 13 руб. 50 коп.

Приборы среднего габарита

Микроамперметры и милливольтметры типа М900 магнитоэлектрической системы предназначены для измерения постоянных токов и напряжений при окружающей температуре от -30 до $+40^\circ\text{C}$, относительной влажности до 90% (при 30°C), со стойкости к механическим воздействиям — обыкновенные с повышенной механической прочностью. Основные характеристики приборов представлены в табл. 5-14. Ориентировочная стоимость 15 руб. 80 коп.

Таблица 5-14

Характеристики приборов типа М900

Микроамперметры, милливольтметры		Микроамперметры	
Диапазон измерений, мкА; мВ	Класс точности	Внутреннее сопротивление, Ом	Сопротивление внешней цепи, Ом, не менее
0—10 0—15 0—20 0—25	1,0; 1,5	5000 5000 5000 800	12,5 4,5 4 4
5—0—5 10—0—10	1,5	5000 500	12,5 4

Ток потребления милливольтметров 1 мА. Габаритные размеры 120×105×64.

Рабочее положение приборов — вертикальное и горизонтальное. Время успокоения не превышает 4 с, для микроамперметров это время выдерживается при сопротивлении внешней цепи не ниже указанных в таблице значений.

Изменение окружающей температуры от нормальной (в пределах рабочих температур) на каждые 10°С приводит к изменению показаний не более $\pm 0,9\%$ для приборов класса 1,0 и $\pm 1,2\%$ — для приборов класса 1,5. Внешнее магнитное поле напряженностью 400 А/м вызывает изменение показаний приборов не более $\pm 1\%$.

Таблица 5-15

Параметры приборов типа М366

Наименование прибора	Диапазон измерений	Включение прибора	Падение напряжения, мВ, не более	Ток потребления, мА, не более
Микроамперметр	0—72—150—300—750 мкА	Непосредственное	20	—
Миллиамперметр	0—1, 5—3—7,5—15; 0—15—30—75—150; 0—75—150—300—750 мА		200 150 100	— — —
Амперметр	0—1,5—3—7,5—15 А		100	—
Вольтметр	0—1,5—3—7,5—15; 0—30—75—150—300; 0—150—300—600—750; 0—1000 В		—	—
Киловольтметры	0—1,5 кВ 0—3 кВ 0—4,5 кВ	С добавочными резисторами	—	3

Приборы типа М366 магнитоэлектрической системы предназначены для измерения постоянных токов и напряжений, применяются в диапазоне температур от 10 до 40°С и относительной влажности до 80% (при 30°С). Основные параметры приборов указаны в табл. 5-15. Класс точности 1,0. Время успокоения подвижной части вольтметров, амперметров и миллиамперметров 1 с, киловольтметров, амперметров и микроамперметров 2 с. Рабочее положение — вертикальное. Изменение окружающей температуры от нормальной $20 \pm 5^\circ\text{C}$ (в пределах рабочих температур) на каждые 10°С не приводит к изменению показаний не более $\pm 1\%$. Внешнее магнитное поле напряженностью 400 А/м при установке прибора на стальном щите толщиной 3 мм вызывает изменение показаний прибора не более $\pm 0,5\%$ конечного значения диапазона измерения. Габаритные размеры прибора 160×160×105 мм, масса 2 кг. Цена 12 руб. 64 коп.

Приборы типов Э377 и Э378 электромагнитной системы предназначены для измерения переменного тока и напряжения частотой 50, 60, 200, 500 и 1000 Гц, применяются в диапазоне от -40 до $+50^\circ\text{C}$ и относительной влажности до 98% (при 35°С), вибро- и тряскопрочные, пыле- и брызгозащищенного исполнения.

Амперметры типа Э377 класса точности 1,0 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерения: 1,5; 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 500 мА; 1, 2, 3, 5, 10, 20 А.

Многопредельные амперметры типа Э377 класса точности 1,0 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерения 3—7; 5—15; 15—30—75—150; 300—750—1500 мА; 1,5—3—7,5—15 А.

Амперметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 50 или 60 Гц, включаемые непосредственно, имеют пределы измерения 1,5; 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 250, 500, 750 мА; 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300 А; включаемые через трансформатор тока (вторичный ток 1 или 5 А) имеют пределы измерения 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 800 А; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5, 6, 8, 10, 15 кА.

Амперметры перегрузочные типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частот 50 и 60 Гц, включаемые непосредственно, имеют диапазоны измерения (в скобках предел на перегрузочной части шкалы) в амперах: 0,2—1 (6); 0,6—3 (20); 1—5 (30); 2—10 (60); 4—20 (100); 3—15 (80); 6—30 (200); 10—50 (300); включаемые через трансформатор тока (вторичный ток 1 или 5 А): 1—5 (30); 2—20 (60); 3—15 (80); 4—20 (100); 6—30 (200); 8—40 (250); 10—50 (300); 17—75 (400); 20—100 (600); 30—150 (800); 40—200 (1000); 60—300 (2000); 80—400 (2500); 120—600 (3000); 150—800 (4000); 200—1000 (6000); 300—1500 (8000); 600—3000 (20 000) А; 0,8—4 (25); 1—5 (30); 1,2—6 (30); 1,5—8 (40); 2—10 (60); 3—15 (90);

5—25 (150) кА. В области перегрузок основная погрешность не более $\pm 6\%$ разности конечных значений перегрузочной шкалы и диапазона измерений.

Амперметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 200 Гц включаются непосредственно и имеют предел измерения 50 А.

Амперметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 500 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300 А.

Амперметры типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 1000 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 100, 600 мА; 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 А.

Вольтметры типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 1; 1,5; 3; 7,5; 15, 30, 50, 150, 250, 500, 600 В.

Вольтметры номинального напряжения типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют номинальное значение напряжения (в скобках диапазон измерений): 36 (30—40); 100 (90—120); 127 (110—150); 220 (180—250); 380 (320—420) В.

Вольтметры многопредельные типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют диапазоны измерений 7,5—15; 75—150; 30—300; 150—300—600 В.

Вольтметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 50 или 60 Гц, включаемые непосредственно, имеют пределы измерений 0,5; 1; 1,5; 3, 15, 30, 50, 75, 100, 250, 500, 600 В. Включаемые через трансформатор напряжения (вторичное напряжение 100 В), имеют пределы измерений 450, 600, 750 В; 3; 5; 7,5; 12,5; 15; 17,5; 20, 35, 40, 125, 250, 400, 600 кВ.

Вольтметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 200 Гц включаются непосредственно и имеют предел измерения 250 В.

Вольтметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 500 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 15, 30, 50, 150, 250, 500, 600 В.

Вольтметры типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 1000 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 10, 15, 30, 50, 150, 250, 500, 600 В.

Время успокоения подвижной части 4 с. Рабочее положение приборов — вертикальное. Изменение окружающей температуры от нормальной 20°C (в рабочем диапазоне температур) на каждые 10°C приводит к изменению показаний до $\pm 0,5\%$ — для приборов типа Э377 класса 1,0 и $\pm 0,8\%$ для приборов класса 1,5. Внешнее магнитное поле напряженностью 400 А/м вызывает изменение показаний приборов до $\pm 2,5\%$; отклонение приборов от вертикального положения на 45° в любом направлении — до $\pm 1\%$ для приборов класса 1,0 и до $\pm 1,5\%$ — для приборов класса 1,5; отклонение частоты от номинальной на $\pm 10\%$ —

до $\pm 1\%$ для приборов класса 1,0 и $\pm 1,5\%$ — для приборов класса 1,5.

Габаритные размеры прибора типа Э377 $120 \times 120 \times 116$ мм, масса 1 кг; прибора типа Э378 $160 \times 160 \times 125$ мм; масса 1 кг. Ориентировочная стоимость Э377 — 4 руб. 30 коп.; Э378 — 4 руб. 57 коп.

Ваттметры однофазные типа Д307 предназначены для измерения мощности в однофазных цепях переменного тока частоты 50 Гц, применяются для комплектовки щитов электростанций и пультов управления, работает в диапазоне температур от -40 до $+50^\circ\text{C}$ и относительной влажности до 96% (при 35°C), вибро- и тряскопрочный, в пыле- и брызгозащищенном корпусе. Класс точности 1,5. Номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$. Включается непосредственно или через трансформаторы тока и напряжения. При непосредственном включении напряжения 127, 220 или 380 В; при включении через трансформаторы номинальные напряжения от 380 до $5 \cdot 10^5$ В. Номинальные токи от 5 до 15 000 А. Конечные значения шкалы от 0,6 до 800 кВт; от 1 до 800 МВт, от 1 до 8 ГВт. Время успокоения подвижной части 4 с. Рабочее положение — вертикальное. Шкала равномерная. Изменение показаний, вызванное отклонением окружающей температуры от номинальной $20 \pm 5^\circ\text{C}$ (в пределах рабочих температур) на каждые 10°C не превышает $\pm 0,8\%$; вызванное действием внешнего магнитного поля напряженностью 400 А/м — не более $\pm 2,5\%$; вызванное отклонением на 45° от вертикального положения в любом направлении, изменением частоты на $\pm 10\%$ и напряжения на $\pm 20\%$ — не более $\pm 1,5\%$. Габаритные размеры $160 \times 160 \times 75$ мм, масса 1,2 кг. Цена 15 руб.

Ваттметры и варметры типов Д335 и Д335/1 ферродинамической системы предназначены для измерения активной и реактивной мощности в трехфазных трехпроводных цепях переменного тока частоты 50 Гц. Рабочий диапазон температур от -40 до $+50^\circ\text{C}$, относительная влажность до 95% (при 35°C). Тряско- и вибропрочные. Номинальный коэффициент мощности для ваттметров $\cos \varphi = 1$, для варметров $\sin \varphi = 1$. Класс точности 1,5. Включаются непосредственно или через трансформаторы. При непосредственном включении напряжения 127, 220 или 380 В; при включении через трансформатор с выходным напряжением на 100 или 127 В, диапазон номинальных напряжений расширяется от 380 до $5 \cdot 10^5$ В. Номинальный ток — от 5 до 15 000 А.

Конечные значения шкалы прибора:	кВт (квар)	МВт (Мвар)	ГВт (Гвар)
с нулем слева	1—800	4—800	1,2—12
с нулем посредине	От 1—0—1 до 800— 0—800	От 4—0—4 до 800— 0—800	От 1,2—0—1,2 до 12—0—12

Шкала равномерная. Подвижная часть на растяжках. Изменение показаний вследствие отклонения окружающей температуры

и действия внешнего магнитного поля аналогичны ваттметру Д307 (см. выше), при установке прибора на ферромагнитном щите толщиной 3 мм — не превышает $\pm 1\%$, при изменении порядка следования фаз по сравнению с обозначенным на приборе — не превышает $\pm 1,5\%$. Габаритные размеры прибора типа Д335 $120 \times 120 \times 96$ мм, прибора типа Д335/1 $160 \times 160 \times 113$ мм, масса прибора 1,2 кг. Цена 18 руб. 60 коп.

Ваттметры трехфазные четырехпроводные типа Ф323 ферродинамической системы предназначены для измерения активной мощности в трехфазных четырехпроводных цепях переменного тока частоты 50 Гц с равномерной и неравномерной нагрузкой фаз, применяется для комплектровки щитов электростанций и пультов управления. Рабочий диапазон температур от -40 до $+50^\circ\text{C}$, относительная влажность до 96% (при 35°C). Тряско- и вибропрочный. Номинальный коэффициент мощности $\cos \phi = 1$. Класс точности 2,5. Рабочее положение — вертикальное. Номинальные напряжения и токи при непосредственном включении: 220 и 380 В; 5, 10, 15, 20, 30 и 40 А. С помощью измерительных трансформаторов тока номинальный ток расширяется до 15 000 А. Изменение показаний вследствие отклонения окружающей температуры от $20 \pm 5^\circ\text{C}$ (в диапазоне рабочих температур) не превышает $\pm 1,2\%$ на каждые 10°C ; под действием внешнего магнитного поля с индукцией $5 \cdot 10^{-4}$ Тл (напряженностью 400 А/м) — не более $\pm 5\%$, при установке прибора на ферромагнитном щите толщиной 3 мм — не превышает $\pm 1\%$, при отклонении прибора от вертикального положения на 45° в любом направлении, а также под влиянием неравномерной нагрузки фаз — не превышает $\pm 2,5\%$. Габаритные размеры прибора $160 \times 160 \times 74,6$ мм, масса 1,2 кг. Ориентировочная стоимость 20 руб. 70 коп.

Фазометры типа Д362, Д363 и Д364 ферродинамической системы (логометры) предназначены для измерения коэффициента мощности $\cos \phi$ в двухпроводных (однофазных) цепях (Д364) и трехфазных цепях (Д362, Д363) переменного тока частоты 50 Гц при равномерной нагрузке фаз и симметрии линейных напряжений. Рабочий диапазон температур от -40 до $+50^\circ\text{C}$, относительная влажность до 95% (при 35°C). Тряско- и вибропрочные. Диапазон измерения в значениях $\cos \phi$ приборов типа Д362 и Д363 0,1—1—0,5 или 0,9—1—0,2, класс точности 1,5; приборов типа Д364 0,5—1—0,5, класс точности 2,5. При непосредственном включении приборов — номинальный ток 5 А, номинальные напряжения 127, 220 или 380 В. Токи и напряжения могут быть расширены посредством трансформаторов тока с выходным током 5 или 1 А и напряжения с выходным напряжением 100 В. Фазометры с диапазоном измерения 0,9—1—0,2 предназначены только для непосредственного включения на номинальные напряжения 127 и 220 В. Время успокоения подвижной части 4 с. Нормальное положение — вертикальное.

Изменение показаний вследствие отклонения окружающей температуры от нормальной (в пределах рабочих температур) на каждые 10°C не более $\pm 0,8\%$ для приборов типа Д362 и Д363 и $\pm 1,2\%$ — для прибора типа Д364; под действием внешнего магнитного поля напряженностью 400 А/м — не более $\pm 2,5\%$ для приборов типа Д362 и Д363 и $\pm 5\%$ для приборов типа Д364. Габаритные размеры прибора типа Д363 $120 \times 120 \times 108$ мм, масса 0,7 кг; приборов типа Д363 и Д364 $160 \times 160 \times 82$ мм, масса прибора Д363 0,9 кг, прибора Д364 1 кг. Цена 25 руб.

Частотометры типа Э371 и Э372 электромагнитной системы (логометры) предназначены для измерения частоты в цепях переменного тока. Рабочий диапазон температур от -40 до $+50^\circ\text{C}$, относительная влажность до 95% (при 35°C). Тряско- и вибропрочные. Класс точности 2,5. Рабочее положение — вертикальное. Шкала безнулевая равномерная. Характеристики частотомеров представлены в табл. 5-16. Потребляемая мощность приборов, включенных через трансформаторы, 0,7—3 В.А. Время успокоения подвижной части 4 с. Изменение показаний вследствие отклонения окружающей температуры от нормальной $20 \pm 5^\circ\text{C}$ (в пределах рабочих температур) на каждые 10°C не более $\pm 1,2\%$; под действием внешнего магнитного поля напряженностью 400 А/м не более $\pm 5\%$; при отклонении прибора от вертикального положения на 45° в любом направлении — не более $\pm 2,5\%$. Габаритные размеры прибора типа Э371 $160 \times 160 \times 91$ мм, масса 1,8 кг; прибора типа Э372 $120 \times 120 \times 89$ мм, масса 1,2 кг. Цена 5 руб.

Таблица 5-16

Характеристики частотомеров Э371 и Э372

Предел измерения, Гц	Номинальное напряжение, В	Включение прибора
45—55, 450—550	127, 220, 380	Непосредственное
45—55	100	Через трансформатор напряжения
180—220	220	Непосредственное

5-13. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ. ОБРАБОТКА ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Погрешности измерений систематизируются по двум основным признакам: месту возникновения и характеру проявления (рис. 5-16).

Методическими погрешностями называют составляющие погрешности измерения, возникающие из-за несовершенства методов измерения и обработки результата измерения.

Инструментальными погрешностями измерений называют погрешности, обусловленные несовершенством (ограниченной точностью) применяемых средств измерения.

Личные погрешности обусловлены индивидуальными особенностями лица (экспериментатора), выполняющего измерение. Личные погрешности проявляются, например, в неправильном отсчитывании десятых долей деления шкалы прибора, неправильной фиксации момента исчезновения изображения нити накаливания на экране оптического пирометра и т. п.



Рис. 5-16. Систематизация погрешностей измерений.

Систематическая погрешность — составляющая погрешности результата измерения конкретной физической величины, остающаяся постоянной или изменяющаяся как детерминированная функция некоторых аргументов. Качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей результатов измерений, называют правильностью измерений.

Случайная погрешность — составляющая погрешности результата измерения конкретной физической величины, изменяющаяся как центрированная случайная величина. Качество измерений, отражающее близость результатов измерений, выполненных в одних и тех же условиях, называют сходимостью измерений. Хорошая сходимость свидетельствует о малости случайных погрешностей.

Промехи — следствие неправильных действий экспериментатора. Это, например, неправильное снятие показаний прибора, ошибка при записи результата наблюдения и т. п. Промехи всегда исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Погрешности измерений определяют зону неопределенности результата измерений. Если погрешность отвечает некоторой вероятностью, то ее называют доверительной погрешностью, а границы, в которых находится погрешность, — доверительными границами погрешности результата измерения. Если границы погрешности назначены так, что погрешность измерения не выйдет за эти границы, то зона внутри указанных границ называется предельной погрешностью измерения.

Погрешности измерений не требуется знать очень точно. В окончательной записи погрешности измерения принято выражать числом с одной или двумя значащими цифрами, причем две цифры оставляют при точных измерениях, а также в тех случаях, когда цифра старшего разряда числа, выражающего погрешность измерения, равна

трем или меньше трех. Если погрешность выражают числом с одной значащей цифрой, то цифру 9 не применяют; если погрешность выражается двумя значащими цифрами, то для младшего разряда обычно применяют только цифру 5. При промежуточных расчетах используют три-четыре значащих цифры погрешности в зависимости от выполняемой математической операции, чтобы в последующем погрешность округления не слишком искажала результат.

Способы описания случайных погрешностей

Случайные погрешности описываются методами теории вероятностей, при этом случайная погрешность рассматривается как случайная величина.

Случайная величина полностью описывается интегральной функцией распределения $F(x)$, которая выражает вероятность того, что случайная величина X будет меньше x ;

$$F(x) = P(X \leq x),$$

где $F(x)$ — неубывающая функция, причем $F(-\infty) = 0$, $F(+\infty) = 1$.

Наряду с интегральной функцией распределения применяется дифференциальная функция распределения, называемая также плотностью вероятности $f(x)$:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

В измерительной практике встречаются с различными законами распределения погрешностей. Однако чаще всего имеют дело с нормальным распределением.

В случае нормального распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где m — математическое ожидание случайной величины (истинное значение измеряемой величины); σ — среднеквадратическое отклонение.

Вероятность P попадания на интервал $[-\Delta_1; \Delta_2]$ при $m=0$ для нормального закона распределения равна:

$$P = \int_{-\Delta_1}^{+\Delta_2} f(x) dx = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\Delta_1}^{\Delta_2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Последний интеграл через элементарные функции не выражается, поэтому подсчет вероятности P производится с помощью интеграла вероятности (функции Лапласа):

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

для которого составлена таблица [5-5—5-7]

$$P = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\Delta_2}{\sigma} \right) + \Phi \left(\frac{\Delta_1}{\sigma} \right) \right] = \\ = \frac{1}{2} [\Phi(z_2) + \Phi(z_1)],$$

где $z_1 = \Delta_1/\sigma$; $z_2 = \Delta_2/\sigma$.

Для симметричного интервала ($\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$) последнее выражение упрощается:

$$P = \Phi \left(\frac{\Delta}{\sigma} \right) = \Phi(z).$$

Если $m \neq 0$, то

$$P = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\Delta_2 - m}{\sigma} \right) + \Phi \left(\frac{\Delta_1 + m}{\sigma} \right) \right].$$

Нормальный закон распределения полностью характеризуется двумя параметрами—математическим ожиданием m и дисперсией D или среднеквадратическим отклонением $\sigma = \sqrt{D}$. Определить точные значения m и D по ограниченному числу наблюдений невозможно. Однако им можно дать приближенные оценки $\tilde{m}$ и $\tilde{D}$. К указанным оценкам предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности. Оценка $\tilde{a}$ параметра a называется состоятельной, если при увеличении числа наблюдений n она приближается к параметру a . Оценка $\tilde{a}$ называется несмещенной, если замена параметра a его оценкой $\tilde{a}$ не приводит к систематическим ошибкам в сторону завышения или занижения, т.е. если выполняется условие $M[\tilde{a}] = a$. Оценка $\tilde{a}$ называется эффективной, если она обладает наименьшей дисперсией по сравнению с другими.

В случае нормального закона распределения всем указанным требованиям удовлетворяют оценки

$$\tilde{m} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$$

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\tilde{D}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{m})^2}{n-1}},$$

или

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\tilde{D}} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \tilde{m}^2 \right) \frac{n}{n-1}}.$$

Поскольку выполнение указанных требований к оценкам зависит от вида закона распределения погрешностей, то возникает

задача проверки нормальности распределения случайных погрешностей. Эта задача решается с помощью критериев согласия. Известен ряд критериев согласия: К. Пирсона (критерий χ^2), А. Н. Колмогорова и др. [5-5]. Однако на практике при большом числе наблюдений ($n > 50$) предпочтение отдается критерию К. Пирсона. Сущность этого метода заключается в сравнении гистограммы экспериментальных данных с аналогичной гистограммой, построенной на основе нормального распределения.

Доверительные интервалы

Для оценки степени достоверности результата измерения пользуются понятиями доверительного интервала и доверительной вероятности.

Доверительным интервалом называется интервал I_d , который с заданной вероятностью P_d , называемой доверительной, покрывает истинное значение измеряемой величины a :

$$I_d = (\tilde{a} - \Delta_1; \tilde{a} + \Delta_2);$$

$$P_d = P(-\Delta_1 < \tilde{a} - a < \Delta_2),$$

где $\tilde{a}$ —оценка величины a , полученная в результате измерения; Δ_1 , Δ_2 —положительные числа, определяющие длину интервала I_d .

При отсутствии систематических погрешностей и известном дифференциальном законе распределения случайных погрешностей вычисление доверительной вероятности не вызывает принципиальных трудностей

$$P_d = P(-\Delta_1 < X < \Delta_2) = \int_{-\Delta_1}^{\Delta_2} f(x) dx.$$

Для симметричного интервала $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$

$$P_d = P(|X| < \Delta) = \int_{-\Delta}^{\Delta} f(x) dx.$$

В случае нормального закона распределения

$$P_d = \Phi \left(\frac{\Delta}{\sigma} \right).$$

Таким образом, если известно, что случайная погрешность подчиняется нормальному закону распределения, то, пользуясь таблицей интеграла вероятностей (функции Лапласа), можно при любом заданном доверительном интервале определить значение соответствующей доверительной вероятности, а также решить обратную задачу.

Если закон распределения случайных погрешностей неизвестен, то можно дать лишь грубую оценку точности результата измерения на основе неравенства Чебышева:

$$P_d = P(|X| < \Delta) \geq 1 - \frac{\sigma^2}{\Delta^2}.$$

Неравенство Чебышева устанавливает нижнюю границу доверительной вероятности. Действительная доверительная вероятность часто оказывается значительно больше. Поэтому неравенство Чебышева на практике применяется редко, только для грубых оценок.

При большом числе наблюдений ($n \geq 10 \div 20$) в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей

закон распределения $\tilde{A}_n$ можно приближенно считать нормальным при произвольных законах распределения независимых величин A_i , причем

$$\sigma_n \approx \tilde{\sigma}_n.$$

В этом случае доверительная вероятность

$$P_d = P(\tilde{A}_n - \Delta_2 < A_n < \tilde{A}_n + \Delta_1) \approx \approx \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{\Delta_2}{\tilde{\sigma}_n}\right) + \Phi\left(\frac{\Delta_1}{\tilde{\sigma}_n}\right) \right].$$

Для симметричного доверительного интервала

$$P_d = P(|\tilde{A}_n - A_n| < \Delta) \approx \Phi\left(\frac{\Delta}{\tilde{\sigma}_n}\right).$$

Обратная задача, т. е. задача определения доверительного интервала по заданной доверительной вероятности, решается с помощью функции Ψ , обратной Φ . Так, половина длины симметричного доверительного интервала Δ равна:

$$\Delta \approx \tilde{\sigma}_n \Psi(P_d).$$

Значения функции Ψ можно найти по таблице, составленной для функции Φ .

При малом числе наблюдений ($n < 10$) закон распределения среднего арифметического может отличаться от нормального закона распределения, а величина $\tilde{\sigma}_n$ значительно отличаться от σ_n . В таком случае следует применять более точные методы расчета доверительной вероятности. Однако при этом необходимо знать априорно вид закона распределения результатов отдельных независимых наблюдений.

Применительно к наиболее распространенному нормальному закону распределения точный метод расчета доверительной вероятности базируется на распределении Стьюдента и доверительная вероятность вычисляется по формулам:

для несимметричного доверительного интервала

$$P_d = F_n\left(\frac{\Delta_1}{\tilde{\sigma}_n}\right) + F_n\left(\frac{\Delta_2}{\tilde{\sigma}_n}\right) - 1,$$

для симметричного доверительного интервала

$$P_d = 2F_n\left(\frac{\Delta}{\tilde{\sigma}_n}\right) - 1,$$

где $F_n(t)$ — интегральная функция распределения Стьюдента. Зависимость $F_n(t)$ от параметров $t = \Delta/\tilde{\sigma}_n$ и n представлена таблицей [5-5—5-7].

С помощью этой же таблицы может быть решена и обратная задача — определение доверительного интервала по заданной доверительной вероятности.

Обработка прямых измерений

Обработка измерений имеет цель — дать оценку истинному значению измеряемой величины и определить степень достоверности этой оценки. Здесь рассматривается случай, при котором систематической погрешностью результата измерения можно пренебречь (оценки систематических погрешностей результата измерения рассматриваются ниже), а о законе распределения случайных погрешностей ничего не известно.

Если выполнено только одно измерение и измерительный прибор дал показание A , то в качестве оценки $\tilde{A}_n$ истинного значения измеряемой величины A следует принять это показание. Однако определять степень достоверности полученного результата измерения $\tilde{A}_n$ невозможно, так как закон распределения случайных погрешностей неизвестен.

Если выполнено n независимых измерений одной и той же величины A ($n \geq 2$) и получено n результатов наблюдения $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$, то в качестве оценки истинного значения измеряемой величины берется среднее арифметическое результатов наблюдений

$$A_n = \tilde{a}_n = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n},$$

где a_i — результат отдельного наблюдения.

Точность полученной оценки истинного значения измеряемой величины (результата измерения) характеризуется оценкой дисперсии

$$D[\tilde{A}_n] \approx \tilde{d}_n \approx \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \tilde{a}_n)^2}{n(n-1)}$$

или оценкой среднеквадратического отклонения

$$\tilde{\sigma}_n = \sqrt{\tilde{d}_n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \tilde{a}_n)^2}{n(n-1)}}.$$

Точность метода измерения (точность одного результата наблюдения в полученной серии n результатов наблюдений) ха-

рактеризуется соответственно величинами

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \tilde{a}_n)^2}{n-1}; \quad \tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \tilde{a}_n)^2}{n-1}}.$$

Величина $\tilde{\sigma}_n$ позволяет дать количественную оценку степени достоверности результата измерения, т. е. найти значение доверительного интервала при заданной доверительной вероятности.

Пример [5-77]. Цифровым вольтметром произведено 10 независимых наблюдений одного и того же постоянного напряжения:

№ наблю- дения	U_i , мВ	№ наблю- дения	U_i , мВ
1	2785	6	2816
2	2841	7	2768
3	2773	8	2822
4	2857	9	2793
5	2792	10	2803

Разброс результатов наблюдений связан с наличием случайных погрешностей. Систематические погрешности отсутствуют. Требуется найти:

- оценку $\tilde{U}_n$ истинного значения измеряемого напряжения;
 - характеристики точности метода измерения $\tilde{d}$ и $\tilde{\sigma}$, а также характеристику точности $\tilde{\sigma}_n$ оценки истинного значения измеряемого напряжения;
 - приближенное значение доверительной вероятности того, что истинное значение измеряемого напряжения отличается от $\tilde{U}_n$ не более, чем на 20 мВ;
 - приближенное значение симметричного доверительного интервала, соответствующего доверительной вероятности 0,9.
- Решение 1.**

$$\tilde{U}_n = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} = 2805 \text{ мВ}.$$

2. Для нахождения параметров $\tilde{d}$ и $\tilde{\sigma}$ необходимо предварительно вычислить разности вида $U_i - \tilde{U}_n$ и квадраты этих разностей. Результаты вычислений сведены в таблицу.

$U_i - \tilde{U}_n$	$(U_i - \tilde{U}_n)^2$	$U_i - \tilde{U}_n$	$(U_i - \tilde{U}_n)^2$
-20	400	+11	121
+36	1296	-37	1369
-32	1024	+17	289
+52	2704	-12	144
-13	169	-2	4

Далее получим:

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \tilde{U}_n)^2}{n-1} = 836 \text{ мВ}^2;$$

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\tilde{d}} = 29 \text{ мВ};$$

$$\tilde{\sigma}_n = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}} = 9 \text{ мВ}.$$

3. А) Используя неравенство Чебышева и учитывая, что $\Delta = 20$ мВ, получаем:

$$P_d \geq 1 - \frac{\sigma_n^2}{\Delta^2} \approx 1 - \frac{\tilde{\sigma}_n^2}{\Delta^2} = 0,8.$$

На этом основании результат обработки наблюдений можно представить в виде

$$U = 2805 \pm 20 \text{ мВ}$$

с вероятностью, большей 0,8.

Б) Второй, более точный способ вычисления доверительной вероятности дает:

$$P_d \approx \Phi\left(\frac{\Delta}{\tilde{\sigma}_n}\right) = \Phi\left(\frac{20}{9}\right) = 0,974;$$

на этом основании результат обработки наблюдений можно представить в виде

$$U = 2805 \pm 20 \text{ мВ}$$

с вероятностью, примерно равной 0,974.

4.

$$\Delta \approx \tilde{\sigma}_n \Psi(P_d) = 9 \cdot 1,645 = 15 \text{ мВ}.$$

На этом основании результат обработки наблюдений можно представить в виде

$$U = 2805 \pm 15 \text{ мВ}$$

с вероятностью, примерно равной 0,9.

Систематические погрешности измерений

Выделяют три источника систематических погрешностей: метод измерения, средство измерения и экспериментатор. В соответствии с этим систематические погрешности разделяют на методические, инструментальные и личные.

Методические погрешности обусловлены несовершенством метода измерения и влиянием средства измерений на объект, свойства которого измеряются. Например, потребление вольтметром тока из цепи измерения вызывает падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника измеряемого напряжения, что приводит к методической погрешности измерения.

Инструментальные — вызываются несовершенством средств измерений, например неточностью подгонки сопротивлений резисторов, неточной градуировкой, инерционностью функциональных узлов средств измерений и т. п.

Личные — систематические погрешности, связанные с индивидуальными особенностями наблюдателя.

Обнаружение систематических погрешностей — сложная задача, особенно постоянных погрешностей, так как последние в процессе измерения ничем себя не проявляют. Поэтому и устранение систематических погрешностей производится не математической обработкой экспериментальных данных, а применением более точных методов измерений. Для этих целей в электроизмерительной технике наиболее часто пользуются методом замещения и методом компенсации погрешности по знаку.

Метод замещения, сущность которого описана выше, дает наиболее полное решение задачи.

Метод компенсации погрешности по знаку предполагает такую организацию эксперимента, в результате которого получают два наблюдения, причем систематическая погрешность в результат каждого из них входит с разными знаками. Полу- сумма полученных наблюдений дает результат измерения без систематической погрешности. Например, при измерении низкоомных сопротивлений мостом возможна систематическая погрешность, обусловленная термо-ЭДС. Для исключения погрешности производят два измерения при различных полярностях питающего мост напряжения. В качестве результата измерения берут полусумму полученных наблюдений, которая свободна от влияния термо-ЭДС.

Систематическая погрешность результата измерения оценивается по ее составляющим. Если выявлен источник систематической погрешности и получена оценка погрешности, то она устраняется из результата измерения путем введения поправки. Поправка равна погрешности с обратным знаком. Однако чаще анализ позволяет установить лишь границы составляющих систематической погрешности и возникает задача оценки систематической погрешности результата измерения путем суммирования ее составляющих.

При большом числе составляющих, равноценных по своему вкладу в общую погрешность, результирующее распределение можно считать нормальным. Дисперсию такого распределения определяют по оценкам дисперсий составляющих.

При малом числе составляющих (два, три) результирующую погрешность находят путем их арифметического суммирования. Однако такой подход дает завышенное значение результирующей погрешности.

Если число составляющих не велико и известны границы интервалов θ_i , в пределах которых находится каждая их составляющая x_i систематической погрешности ($-\theta_i \leq x \leq \theta_i$), то результирующую погрешность θ рекомендуется [5-6] вычислять по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \theta_i^2},$$

где k — поправочный коэффициент.

Коэффициент k зависит от числа слагаемых n и доверительной вероятности P_d , однако при $P_d \leq 0,99$ его зависимость от n слабая и для расчетов можно пользоваться усредненным значением k независимо от числа слагаемых n :

P_d	0,90	0,95	0,98	0,99
k	0,95	1,1	1,3	1,4

При этом отклонение k от действительных значений не превышает $\pm 10\%$.

Вычисление результирующей погрешности θ при малых $n=2 \div 3$ может дать результат, превышающий арифметическую сумму θ_i , что противоречит здравому смыслу. В таком случае θ следует вычислять как арифметическую сумму θ_i .

Таким образом, при вычислениях результирующей систематической погрешности θ рекомендуется пользоваться соотношениями [5-6]:

$$\theta = \begin{cases} k \sqrt{\sum_{i=1}^n \theta_i^2}, & \text{если } k \sqrt{\sum_{i=1}^n \theta_i^2} < \sum_{i=1}^n \theta_i, \\ \sum_{i=1}^n \theta_i, & \text{если } k \sqrt{\sum_{i=1}^n \theta_i^2} \geq \sum_{i=1}^n \theta_i. \end{cases}$$

Оценка систематических погрешностей производится на основе нормативных данных о характеристиках используемых средств измерений. При этом учитываются пределы допускаемой основной погрешности Δ_0 , пределы имевших место в данном эксперименте дополнительных погрешностей θ_i и методические погрешности. Личные погрешности в этом случае обычно не учитывают ввиду их малости.

Суммирование составляющих погрешности измерения выполняется статистически с учетом вида функций распределений составляющих. Если сведения о виде функций распределений составляющих отсутствуют, то применяется допущение о равномерности функций распределения составляющих.

Методику приближенной оценки систематической погрешности результата измерения проиллюстрируем следующим примером.

Вольтметром класса 0,5 (ГОСТ 13600-68 и ГОСТ 8711-68) измеряется напряжение на выводах активного двухполюсника. Выходное сопротивление активного двухполюсника $r \leq 300$ Ом. Вольтметр имеет диапазон измерений 0—300 В и внутреннее сопротивление $r_B = 300$ кОм. Показания прибора 201,5 В. Внешние условия: окружающая температура $+30^\circ \text{C}$, напряженность возможного магнитного поля 400 А/м. Остальные условия измерения нормальные. Априори известно, что измеряемое напряжение неизменно, и поэтому в повторных наблюдениях нет необходимости. Требуется оценить погрешности измерения.

Дадим оценку составляющим погрешности измерения.

Методическая погрешность, обусловленная падением напряжения на внутреннем сопротивлении активного двухполюсника, создаваемым током, протекающим через вольтметр, в относительной форме равна:

$$\theta_m \leq \frac{r}{r_B + r} 100\% = \frac{300}{30300} 100\% \approx 0,1\%.$$

Методическая погрешность существенно меньше основной и поэтому ею можно пренебречь.

Границы основной относительной погрешности прибора

$$\theta_0 = \pm \frac{0,5 \cdot 300}{201,5} \approx \pm 0,75\%.$$

Границы дополнительной погрешности от влияния магнитного поля $\theta_H = \pm 0,5\%$.

Границы дополнительной погрешности от изменения окружающей температуры на 10°C относительно нормального значения $\theta_t = \pm 0,5\%$.

Личные погрешности входят в основную.

Найдем доверительные границы погрешности результата измерения для $P_{\Delta} = 0,95$ ($k=1,1$):

$$\theta = k \sqrt{\theta_0^2 + \theta_H^2 + \theta_t^2} = 1,1 \times \\ \times \sqrt{0,75^2 + 0,5^2 + 0,5^2} \approx 1,1\%.$$

Данное измерение не является точным, поэтому полученный результат можно округлить и принять $\theta=1\%$. Границы абсолютной погрешности результата измерения равны $\Delta = \pm 2$ В. Следовательно, последняя цифра в числовом значении показания прибора недостоверна и ее надо исключать, пользуясь правилами округлений.

Результат измерения в окончательной форме примет вид: $U = 201 \pm 2$ В; $P_{\Delta} = 0,95$.

5-14. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Окончательный результат измерения представляется в виде значения измеряемой величины и показателей точности. Показатели точности измерений, способы выражения точности измерения и формы представления результатов измерений определены ГОСТ 8.011-72.

ГОСТ 8.011-72 устанавливает следующие показатели точности измерений:

интервалы, в которых с заданной вероятностью находится погрешность измерения или ее систематическая составляющая; числовые характеристики систематической и случайной составляющей погрешности измерения;

функции распределения (плотности вероятности) систематической и случайной составляющей погрешности измерения.

Точность измерения в зависимости от назначения измерений и характера использования их результатов согласно ГОСТ 8.011-72 должна выражаться одним из следующих способов:

доверительным интервалом и доверительной вероятностью суммарной погрешности измерения;

доверительным интервалом и доверительной вероятностью систематической составляющей погрешности, стандартной аппроксимацией функции распределения и среднеквадратическим отклонением случайной составляющей погрешности измерения;

стандартными аппроксимациями функций распределения и среднеквадратическими отклонениями как систематической, так и случайной составляющих погрешности измерения;

функциями распределения систематической и случайной составляющих погрешности измерения.

Численные показатели точности должны выражаться в единицах измеряемой величины; содержать не более двух значащих цифр; наименьшие разряды численных показаний точности и числовых зна-

чений результата измерения должны быть одинаковыми.

При оформлении результатов нескольких измерений, характеризующихся одинаковыми значениями показателей точности, последние указываются один раз для всех результатов измерений.

ГОСТ 8.011-72 устанавливает четыре возможные формы представления результатов измерения в зависимости от способа выражения точности измерения.

Первая форма. При выражении точности измерений доверительным интервалом и доверительной вероятностью суммарной погрешности измерения указываются: Δ ; Δ от Δ_n до Δ_v ; P , где Δ — результат измерения в единицах измеряемой величины; Δ_n , Δ_v — соответственно погрешность измерения; ее нижняя и верхняя границы в тех же единицах; P — доверительная вероятность.

Пример: 220 В; Δ от -2 до $+2$ В; $P=0,95$.

Первая форма представления результата измерения применяется на практике наиболее часто: в случае разовых измерений, результаты которых используются для принятия тех или иных решений; при контроле и т. п.

Вторая форма. Применяется в случае выражения точности измерений доверительным интервалом и доверительной вероятностью систематической составляющей погрешности измерения, стандартной аппроксимацией функции распределения и среднеквадратическим отклонением случайной составляющей погрешности измерения. В данном случае указываются:

$$\Delta; \Delta_c \text{ от } \Delta_{c,n} \text{ до } \Delta_{c,v}; P_c; \tilde{\sigma}(\Delta); f_{\Delta}^{CT}(\xi),$$

где Δ — результат измерения в единицах измеряемой величины; Δ_c , $\Delta_{c,n}$, $\Delta_{c,v}$ — соответственно систематическая составляющая погрешности измерения, ее нижняя и верхняя границы в тех же единицах; P_c —

доверительная вероятность; $\tilde{\sigma}(\Delta)$ — оценка среднеквадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения в единицах измеряемой величины; $f_{\Delta}^{CT}(\xi)$ — стандартная аппроксимация функции плотности вероятности случайной составляющей погрешности измерения, выбирается из перечня в табл. 5-19.

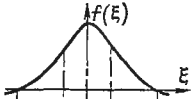
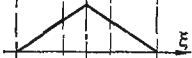
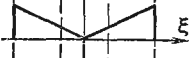
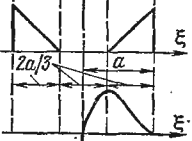
Пример: 250 В; Δ_c от -2 до 2 В; $P_c = 0,95$; $\tilde{\sigma}(\Delta) = 1$ В; равн.

Третья форма. Применяется при выражении точности измерений стандартными аппроксимациями функций распределения и среднеквадратическими отклонениями как систематической, так и случайной составляющих погрешности измерения, указываются:

$$\Delta; \tilde{\sigma}(\Delta_c); f_{\Delta_c}^{CT}(\xi); \tilde{\sigma}(\Delta); f_{\Delta}^{CT}(\xi),$$

Таблица 5-17

Стандартные аппроксимации функций распределения (ГОСТ 8.011-72)

Наименование функции	Сокращенное обозначение	График	$a \sigma$
Нормальная (усеченная)	норм.		3
Треугольная (Симпсона)	Δ		2,4
Трапецевидная	трап.		2,3
Равномерная	равн.		1,7
Антимодальная I	амI		1,5
Антимодальная II	амII		1,8
Релея (усеченная)	—		3,3

Пример: 215 В;

$$f_{\Delta c}(\xi) = 0,2 \text{ В}^{-1} \text{ при } -1 \text{ В} \leq \xi < 1 \text{ В};$$

$$f_{\Delta c}(\xi) = 0 \quad \text{при } -1 \text{ В} > \xi \geq 1 \text{ В};$$

$$f_{\Delta}(\xi) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} e^{-\xi^2/8} \text{ В}^{-1}.$$

Четвертая форма представления результата измерения применяется в сложных и ответственных экспериментах.

Пример: 23,05 В; $\tilde{\sigma}(\Delta_c) = 0,02$ В; равн.; $\tilde{\sigma}(\Delta) = 0,01$ В; норм.

Третью форму представления результата измерения следует применять в тех случаях, когда возникает необходимость в последующем суммировать обе составляющие погрешности, например при определении составляющих погрешности результата косвенных измерений.

Четвертая форма. Используется при выражении точности измерений функциями распределения систематической и случайной составляющих погрешности измерения, при этом указываются:

$$A; f_{\Delta c}(\xi); f_{\Delta}(\xi),$$

где $f_{\Delta c}(\xi)$, $f_{\Delta}(\xi)$ — соответственно функции плотности вероятностей систематической и случайной составляющих погрешностей измерения; обе функции должны задаваться в одинаковом виде таблицами, графиками или формулами.

5-15. ПЕРЕЧЕНЬ

ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ
НА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ

ГОСТ 8.001-71	Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений
ГОСТ 8.009-72	ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений
ГОСТ 8.011-72	ГСИ. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений
ГОСТ 8.207-76	ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений

ГОСТ 1609-76	Провода калиброванные для электроизмерительных приборов	ГОСТ 12997-76	Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Общие технические требования. Методы испытаний
ГОСТ 1700-76	Указатели тока аккумуляторных батарей	ГОСТ 13033-67	Приборы и устройства электрические аналоговые ГСП
ГОСТ 1954-75	Меры электродвижущей силы рабочие. Элементы нормальные	ГОСТ 13216-74	Приборы и средства автоматизации ГСП. Надежность. Общие технические требования и методы испытаний
ГОСТ 6570-75	Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные.	ГОСТ 13550-68	Мосты постоянного тока измерительные. Методы и средства поверки
ГОСТ 6864-69	Катушки электрического сопротивления измерительные	ГОСТ 13564-68	Магазины сопротивления постоянного тока измерительные. Методы и средства поверки
ГОСТ 7165-66	Мосты постоянного тока измерительные	ГОСТ 13600-68	Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений. Классы точности
ГОСТ 7324-80	Приборы электроизмерительные. Гальванометры постоянного тока	ГОСТ 13607-68	Приборы и преобразователи электроизмерительные цифровые. Основные термины и определения
ГОСТ 7590-78	Приборы электроизмерительные для измерения частоты аналоговые показывающие	ГОСТ 13626-68	Индикаторы знаковые электрические
ГОСТ 8042-78	Преобразователи измерительные, электрические величины. Шунты измерительные	ГОСТ 14173-69	Частотомеры. Методы и средства поверки
ГОСТ 8476-78	Ваттметры и варметры	ГОСТ 14265-69	Приборы электроизмерительные контактные ГСП
ГОСТ 8623-78	Сопротивления добавочные для электроизмерительных приборов	ГОСТ 14305-69	Стабилизаторы измерительные с регулируемым выходом для электроизмерительных приборов
ГОСТ 8711-78	Амперметры и вольтметры	ГОСТ 14767-69	Счетчики электрической энергии. Методы и средства поверки
ГОСТ 9032-69	Трансформаторы измерительные лабораторные	ГОСТ 15143-69	Потенциометры (компенсаторы) постоянного тока измерительные. Методы и средства поверки
ГОСТ 9071-68	Клещи электроизмерительные. Технические требования	ГОСТ 15182-70	Приборы электроизмерительные узкопрофильные со световым указателем.
ГОСТ 9181-74	Приборы электроизмерительные. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение	ГОСТ 16263-70	Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения.
ГОСТ 9245-79	Потенциометры постоянного тока измерительные.	ГОСТ 17533-72	Приборы электроизмерительные. Общие технические требования в части надежности
ГОСТ 9486-69	Мосты переменного тока измерительные	ГОСТ 20798-75	Меры взаимной индуктивности
ГОСТ 9781-78	Вольтметры электронные	ГОСТ 22261-76	Средства измерений электрических величин
ГОСТ 9829-72	Осциллографы светолучевые	ГОСТ 23217-78	Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения.
ГОСТ 10374-74	Приборы электроизмерительные комбинированные переносные		
ГОСТ 11013-75	Гальванометры осциллографические магнитоэлектрические		
ГОСТ 11282-75	Делители напряжения постоянного тока измерительные		
ГОСТ 11921-78	Компенсаторы переменного тока		
ГОСТ 11931-66	Трансформаторные устройства для измерения постоянных токов.		
ГОСТ 12059-66	Элементы нормальные (меры электродвижущей силы). Методы поверки		
ГОСТ 12931-67	Омметры цифровые. Методы и средства поверки		

5-16. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Магнитные измерения составляют неотъемлемую часть всей электроизмерительной техники. При этом удельный вес магнитных измерений среди других непрерывно возрастает. Объясняется это все более широким использованием магнитных явлений в науке и технике, значительным ростом выпуска ферромагнитных материалов (ФММ) и применением их в электро-технических устройствах, приборах и автоматике.

В основе классификации методов магнитных измерений лежит физическая сущность явлений, используемых для измерительного процесса — преобразования магнитной величины в электрический сигнал.

В связи с этим различают индукционные методы измерения магнитных величин; методы, основанные на взаимодействии двух магнитных полей; методы, основанные на влиянии магнитного поля на физические свойства вещества. На рис. 5-17 представлена классификационная схема наиболее распространенных методов измерения магнитного потока Φ , индукции B и напряженности магнитного поля H .

Сущность индукционного метода измерения заключается в возникновении ЭДС в витках провода при изменении сцепляющегося с ними магнитного потока Φ (рис. 5-18). ЭДС e связана с потоко-сцеплением Ψ соотношением

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\omega \frac{d\Phi}{dt},$$

где ω — число витков катушки.

Если магнитное поле однородное, то магнитный поток находится из выражения

$$\Phi = \int \frac{1}{\omega} e dt = BS,$$

где S — площадь сечения катушки.

В воздушной среде B связана с H соотношением

$$B = \mu_0 H,$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

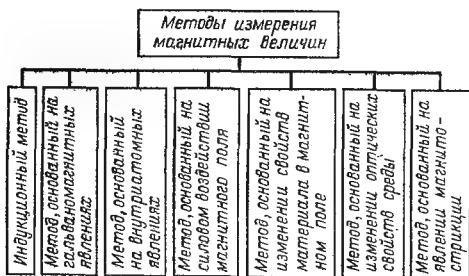


Рис. 5-17. Классификация методов измерения магнитных величин.

Следовательно, индукционный метод измерения позволяет определить магнитный поток, индукцию и напряженность поля

$$\Phi = \frac{1}{\omega} \int e dt, \quad B = \frac{1}{\omega S} \int e dt,$$

$$H = \frac{1}{\omega \mu_0 S} \int e dt.$$

При измерении переменного магнитного потока стационарной катушкой уравнение преобразования имеет вид:

$$E = f(\Phi_{\max}, \omega),$$

где E — действующее значение ЭДС; $\Phi_{\max}$ — максимальное значение магнитного потока; ω — частота изменения его.



Рис. 5-18. К принципу действия индукционного преобразователя.

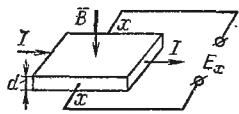


Рис. 5-19. К принципу действия гальваномагнитного преобразователя.

Для импульсных преобразователей (выдергивание катушки из постоянного поля, импульсное изменение потока при стационарной катушке) уравнение преобразования выглядит как

$$rQ = \Delta\Psi = \int e dt,$$

где $\Delta\Psi$ — изменение потока, сцепленного с катушкой; Q — количество электричества; r — сопротивление измерительной цепи.

Вращение измерительной катушки в постоянном поле приводит к уравнению вида

$$E = f(\Phi, \omega).$$

При измерении индукции постоянного поля катушками с изменяющимся сечением на основе пьезострикционного эффекта уравнение преобразования имеет вид:

$$E = f(B, \omega),$$

а на основе электрострикционного эффекта

$$E_2 = f(B, \omega),$$

где E_2 — действующее значение ЭДС четной (чаще второй) гармоники сигнала; ω — частота изменения сечения катушки.

Из гальваномагнитных эффектов в технике магнитных измерений нашли применение эффекты Холла и магниторезистивный. Если через полупроводниковую пластину (рис. 5-19), помещенную в магнитное поле с индукцией B , пропустить электрический ток I , между точками X и X' возникнет разность потенциалов E_x , называемая ЭДС Холла. Связь ее с магнит-

ной индукцией имеет вид:

$$E_X = R_X \frac{IB}{d} = f(I, B) = S_{\Pi} B,$$

где R_X — постоянная Холла, зависящая от концентрации и подвижности носителей зарядов; d — толщина пластины; S_{Π} — чувствительность преобразователя при номинальном токе питания.

Магниторезистивный эффект (эффект Гаусса) заключается в изменении сопротивления материала в магнитном поле. Уравнение преобразования, связывающее

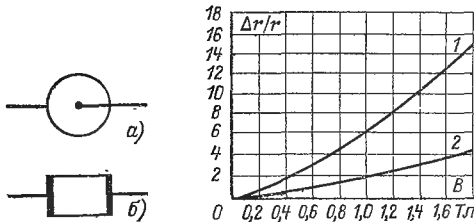


Рис. 5-20. Конфигурация преобразователей магнитосопротивления.

a — диск Корбино; b — прямоугольный преобразователь.

Рис. 5-21. Сравнительные характеристики преобразователей магнитосопротивления.

1 — диск Корбино; 2 — прямоугольный преобразователь.

относительное изменение сопротивления материала и индукцию исследуемого поля, имеет вид:

$$\frac{\Delta r}{r} = f(B^m),$$

где m — показатель, изменяющийся в пределах 1—2.

Магниторезистивные преобразователи выполняются в виде диска Корбино или прямоугольных пластин (рис. 5-20). Сравнительные характеристики некоторых из них приведены на рис. 5-21.

Особое воздействие магнитного поля на поведение элементарных частиц заключается в избирательном поглощении или излучении электромагнитных волн веществом. Различают в зависимости от природы частиц ядерный магнитный (ЯМР), электронный парамагнитный (ЭПР) и ферромагнитный резонанс (ФМР).

Сущность ЯМР заключается в резонансном поглощении веществом электромагнитного излучения при переходах ядер на соседние энергетические уровни. Изменение энергии ΔE , вызванное переходами ядер между энергетическими уровнями, связано с частотой электромагнитного поля, имеющего круговую поляризацию в направлении, перпендикулярном B . Взаимодействие между системой ядер и электромагнитным полем наступает в случае, когда частота

последнего имеет определенное значение [5-12]:

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{\gamma}{2\pi} B,$$

где γ — гиромагнитное отношение; h — постоянная Планка.

Картина взаимодействия прецессирующих магнитных моментов $\vec{m}$ с вращающим магнитным полем амплитуды $H_{\max}$ представлена на рис. 5-22. Если угловая скорость поля ω соответствует резонансному значению ω_0 , то образующие поперечные составляющие намагниченности $M_{\perp}$ вектора $\vec{M}$ определяют резонансную частоту.

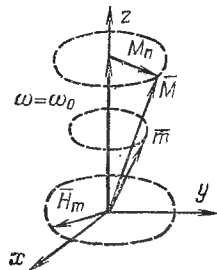


Рис. 5-22. Картина взаимодействия магнитных моментов с магнитным полем.

Сущность электронного парамагнитного резонанса принципиально не отличается от рассмотренного ЯМР. Отличие лишь в резонансной частоте.

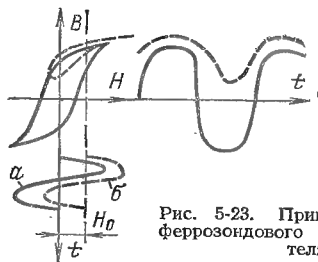


Рис. 5-23. Принцип действия феррозондового преобразователя.

Особенность ферромагнитного резонанса заключается в том, что здесь приходится иметь дело с группой атомов, связанных обменным взаимодействием. Вокруг вектора B прецессирует момент домена и в результате резонансное поглощение на несколько порядков больше, чем у парамагнитных веществ.

Известно, что при одновременном воздействии постоянного и переменного магнитного поля изменяются характеристики ферромагнитных материалов. На этом принципе основан метод измерения параметров магнитного поля с помощью так называемых феррозондовых преобразователей. Сущность метода заключается в том, что при перемагничивании переменным полем ферромагнитного материала, являющегося основной частью первичного преобразователя, гистерезисный цикл получается симметричным; при наложении постоянного измеряемого магнитного поля H_0 изменение

состояния происходит по несимметричному циклу (рис. 5-23). В этом случае переменная составляющая индукции содержит и четные гармоники. Экспериментально показано, что амплитуда второй гармоники B_{2max} на некотором интервале изменения постоянного поля линейно связана с H_0 . Таким образом, уравнение преобразования измеряемого магнитного поля в электрический сигнал имеет вид:

$$E_{2max} = f(H_0),$$

где E_{2max} — амплитуда второй гармоники ЭДС, наводимой в измерительной катушке.

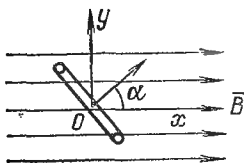


Рис. 5-24. Принцип действия механических преобразователей, основанных на взаимодействии магнитного поля и витка с током.

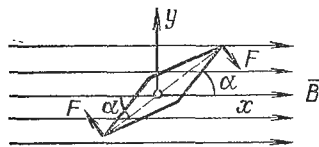


Рис. 5-25. Принцип действия механических преобразователей, основанных на взаимодействии магнитного поля с постоянным магнитом.

Для измерения индукции и напряженности поля широко используются методы взаимодействия измеряемого поля с полем вспомогательного тока и полем постоянного магнита. Если в контуре, расположенном в магнитном поле (рис. 5-24), протекает ток I , создается вращающий момент

$$M_{вр} = I S B \sin \alpha,$$

где S — площадь, охватываемая контуром; α — угол, образуемый плоскостью контура и вектором индукции B .

При создании противодействующего момента $P\alpha$, равного $M_{вр}$ (P — удельный противодействующий момент) в состоянии равновесия, справедливо соотношение

$$P\alpha = I S B \sin \alpha,$$

откуда и вытекает уравнение преобразования

$$\frac{\alpha}{\sin \alpha} = \frac{IS}{P} B = f(B).$$

На этом методе основаны магнитные весы, позволяющие с большой точностью измерять магнитную индукцию. Применяется этот метод также в устройствах отбраковки постоянных магнитов.

Метод взаимодействия измеряемого поля с полем постоянного магнита (рис. 5-25) нашел практическую реализацию в магнит-

ных компасах, буссолях, теодолитах, астатических магнитометрах и других приборах, предназначенных для работы в полевых условиях.

Для измерения слабых магнитных полей иногда используют явление магнитострикции, заключающееся в относительном изменении размеров тела под действием магнитного поля или, что то же самое, с изменением его намагниченности. Большим отрицанием использования явления магнитострикции в практике измерений является влияние на коэффициент преобразования внешних механических воздействий.

Кроме рассмотренных явлений для измерения магнитных величин могут быть использованы и другие эффекты, не получившие пока широкого распространения в практике. К ним относятся эффекты Фарадея, Зеемана, Керра, Коттона-Мутона; Джозефсона и др. [5-13, 5-14].

Методы измерения магнитных величин лежат в основе испытаний магнитных материалов. Все ферромагнитные материалы делятся на магнитно-твердые (МТМ) и магнитно-мягкие (МММ). Первые используются в качестве источников постоянных магнитных полей (постоянные магниты ПМ). Для них к настоящему времени сложились три направления испытаний: исследование свойств МТМ, производственный контроль образцов МТМ, производственный контроль постоянных магнитов. При исследовании свойств МТМ необходимо получать достаточно полную информацию о свойствах материала: начальная кривая намагничивания, предельная петля магнитного гистерезиса, кривые возврата для различных точек размагничивающего участка и др. Измерение индукции производится, как правило, индукционными и гальваномангнитными преобразователями. Измерение напряженности поля обычно сводится к измерению тока в намагничивающих устройствах или получению информации о тангенциальной составляющей напряженности поля от индукционных или гальваномангнитных преобразователей. Перемагничивание МТМ может быть осуществлено постоянным и переменным полем [5-15, 5-21, 5-22]. При намагничивании материала постоянным полем получают статические характеристики. При непрерывном циклическом изменении поля получают динамические характеристики, которые в инфракрасном диапазоне частот перемагничивания могут быть приближены к статическим с необходимой точностью.

Для обеспечения правильности процесса производства МТМ и соответствующей коррекции технологического режима контролируются наиболее важные отдельные параметры материала, в частности, коэрцитивная сила H_c . Алгоритм получения H_c сводится к фиксации нулевых значений магнитной индукции или намагниченности и отсчету напряженности поля.

В основе классификационных признаков контроля постоянных магнитов лежат вид

контролируемых параметров, способ получения информации. Различают контроль по магнитному потоку в системе, близкой к рабочей; контроль по размагничивающему участку. По способу, получения выходной информации различают устройства с непосредственным отсчетом и дифференциальным способом измерения — получением информации в виде разности характеристик образцового и испытуемого ПМ.

Магнитно-мягкие материалы характеризуются магнитными параметрами, измеряемыми в постоянном и переменном полях. Согласно [5-16] основными измеряемыми характеристиками в постоянных полях для МММ являются: основная кривая намагничивания, предельная петля гистерезиса и ее параметры (B_r , H_c), начальная и максимальная магнитные проницаемости. ГОСТ 15058-69 устанавливает в качестве основного балластический метод исследования свойств материала. В настоящее время в связи с разработкой промышленностью унифицированных электронных устройств широкого применения получил распространение метод непрерывного медленно изменяющегося поля [5-17].

В переменных полях основными характеристиками МММ являются основная динамическая кривая намагничивания, динамическая петля гистерезиса, комплексная магнитная проницаемость и удельные потери. Кроме того, в зависимости от частотного диапазона испытания существует еще целый ряд определяемых характеристик и параметров. Наиболее часты испытания МММ в частотном диапазоне 50 Гц — 10 кГц. Основными методами испытания в этом диапазоне частот согласно ГОСТ 18334-73 являются: индукционный с использованием амперметра, вольтметра, ваттметра; индукционный с использованием фазочувствительных приборов (феррометрический); индукционный с использованием потенциометра переменного тока; индукционный с использованием феррографа (осциллографический); индукционный с использованием стробоскопических преобразователей; параметрический (мостовой).

Индукционные методы характеризуются измерением ЭДС, индуктированных в измерительных катушках. Использование амперметра и вольтметра дает возможность определения динамической относительной проницаемости. Являясь наиболее простым, этот способ измерения обладает большой погрешностью (до 10%) и не обеспечивает возможности определения потерь в образцах. Использование ваттметра стандартизировано для определения потерь в образцах из МММ. Преимуществами ваттметрового способа являются простота и высокая производительность, сравнительно небольшая для промышленных испытаний погрешность измерения (5—8%), широкий частотный диапазон испытания (до 10 кГц) [5-18—5-20]. К недостаткам следует отнести малый объем информации и увеличение погрешности при перемагничивании до индукции свыше

1,2 Тл из-за отклонения формы кривой от синусоидальной.

В основу феррометрического способа измерения положено определение мгновенных значений периодических несинусоидальных величин с помощью фазочувствительных приборов. Связь среднего значения производной функции и мгновенного значения самой функции является здесь основой использования инерционных приборов для регистрации динамических характеристик МММ:

$$E_{cp} = \frac{2}{T} \int_t^{t+T/2} e \, dt = 4 f S w B,$$

где E_{cp} — среднее значение ЭДС измерительной катушки.

К преимуществам феррометрического способа измерения относятся: малая погрешность (2—5%); возможность определения большого числа магнитных характеристик, в том числе и расчета потерь. Недостатками способа являются ограниченность размеров образцов и частотного диапазона; длительность процесса измерений и обработки результатов; относительно высокая стоимость устройств.

Осциллографическим способом пользуются для измерения и визуального наблюдения основной динамической кривой намагничивания, семейства симметричных петель гистерезиса, потерь в образцах на частотах от 50 до 500 Гц. К недостаткам способа следует отнести необходимость замеров на экране осциллографа, что связано с увеличением объективных и субъективных погрешностей отсчета.

Наиболее точным из индукционных методов испытания МММ является потенциометрический, основанный на измерении сигналов, пропорциональных B и H , с помощью потенциометров переменного тока. Этим способом определяются зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля, составляющие комплексной магнитной проницаемости, полные потери. Достоинствами способа являются высокая точность измерения и широкий диапазон измеряемых величин. К недостаткам относятся: длительность процесса измерения, высокая стоимость используемой аппаратуры и ее сложность.

Сущность стробоскопического способа измерения заключается в том, что исследуемые периодически изменяющиеся сигналы произвольной формы умножаются на так называемый строб-импульс. При этом перемножение в каждом последующем периоде происходит со сдвигом во времени на некоторый интервал (шаг считывания) по отношению к предыдущему. В результате можно произвести и затем воспроизвести считывание всего периода исследуемого сигнала по точкам. Это дает возможность подобно феррометрическому способу использования для регистрации быстроизме-

няющихся процессов инерционных самопишущих и цифropечатающих приборов. Основным достоинством стробоскопического способа измерения является возможность получения документальной информации о характеристиках ФММ в процессе перематничивания последних.

Параметрический метод испытания магнитных материалов заключается в определении индуктивности и сопротивления катушки с испытуемым магнитопроводом путем уравнивания мостовой схемы. В основном этот метод предназначен для определения характеристик в области слабых полей. Преимуществами его являются: высокая точность измерения, широкий частотный диапазон испытания. К недостаткам относятся: зависимость результатов измерения от индуктивных и емкостных помех, создаваемых элементами схемы измерения; увеличение погрешности на низких частотах испытания; сложность и длительность процесса испытания.

Существуют и другие методы испытания МММ в динамическом режиме перематничивания, однако технико-эксплуатационные характеристики устройств на их основе не эффективны в условиях массовых испытаний, поэтому они не рассматриваются.

5-17. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Основными классами средств магнитных измерения являются: магнитные меры; магнитоизмерительные преобразователи; магнитоизмерительные приборы, установки и системы.

Магнитные меры разделяются на меры магнитного потока, магнитной индукции, магнитного момента. К магнитным мерам относятся также образцы магнитных материалов.

Магнитоизмерительные преобразователи, являясь основными элементами средств

измерений, определяют рассмотренные выше методы измерения магнитных величин. Различают индукционные, феррозондовые, механические, гальваномангнитные, квантовые и другие преобразователи.

Наиболее распространенным для систематизации магнитоизмерительных приборов является принцип использования физического явления в первичных преобразователях магнитных величин. Существует классификация, позволяющая объединять различного типа приборы в группы для осуществления конкретной цели: измерение параметров переменного магнитного поля; измерение параметров постоянного магнитного поля; измерение параметров неоднородного магнитного поля и т. д. Разбные приборы по такому признаку позволяют выработать единые критерии для оценки их метрологических и технико-эксплуатационных характеристик. Различают и другие признаки деления приборов, для ознакомления с которыми можно рекомендовать [5-13, 5-14]. Наименование прибора, установки или системы должно отражать название единицы измеряемой величины и функциональное назначение. Так как в приборах могут быть использованы различные магнитоизмерительные преобразователи, к наименованию прибора целесообразно добавлять наименование преобразователя. В связи с этим различают: веберметры, тесламетры (индукционный, феррозондовый, гальваномангнитный, магнитометрический, ядерный), коэрцитиметры, установки для испытания ФММ, устройства для контроля ГМ и т. д.

Веберметры. Веберметры представляют собой приборы для измерения магнитного потока. Широко применяются они для исследования магнитных свойств различных материалов и при измерении характеристик магнитных полей. Принцип действия их основан на явлении электромагнитной индукции. Элементы теории, особенности применения, эксплуатации и ремонта достаточно подробно рассмотрены в [5-23].

Таблица 5-18

Технические характеристики веберметров

Наименование прибора	Пределы измерения	Внешнее сопротивление, Ом	Основная погрешность, %	Скорость сползания
Милливеберметр М19	10 мВб	8—20	2,5—4,0	0,1 мВб/с
Милливеберметр М119	10 мВб	8—20—30	1,5—2,5—4,0	0,05 мВб/с
Микровеберметр М199	500 мкВб	50	1,5	2,5 мкВб/с
Микровеберметр Ф18	15—75—300 мкВб	100	4,0—2,5—1,5	0,04—0,06—0,1 мкВб/с
Микровеберметр Ф190	2—5—10—20—50—100—500 мкВб	100—300	2,5—1,5	0,005—0,3 мкВб/с
Микровеберметр Ф199	25—50—100—250—500—1000—2500 мкВб	100—1000	(0,05—0,03) Φ_R/Φ_X	—
Микровеберметр Ф5050	10—100—1000—10 000 мкВб	100	(0,003—0,002) Φ_R/Φ_X	—
Флюксметр MF-3A/3D (США)	1—10 000 мВб	100	1,0	1 мкВб/мин

Особенностью веберметров с измерительным механизмом в виде закрепленной на кернах или растяжках подвижной части является сползание указателя от достигнутого максимального отклонения в положение, соответствующее нулю противодействующего момента, причем по мере роста сопротивления внешней цепи скорость сползания увеличивается, что в конечном счете приводит к погрешностям отсчета результатов измерения. Поэтому в числе паспортных характеристик веберметров приводятся значения внешнего сопротивления и скорости сползания указателя. В табл. 5-18 приведены краткие технические характеристики некоторых приборов. Основной тенден-

преобразователей при повреждении. С целью увеличения разрешающей способности выходящая часть холловского тесламетра изготавливается в цифровом варианте. Нижний предел измерения тесламетров ограничивается нестабильностью термо-ЭДС и напряжения неэквипотенциальности. Поэтому во многих разработках используют переменный ток питания PX [5-25]. Верхний предел измерения тесламетров практически не ограничен. Существуют варианты увеличения чувствительности и уменьшения аддитивной составляющей погрешности с помощью схем автоматического управления током питания PX . В табл. 5-19 приведены технические характеристики тесламетров для измерения индукции постоянных магнитных полей.

Таблица 5-19

Технические характеристики гальваномагнитных тесламетров для измерения постоянных магнитных полей

Наименование прибора	Страна-изготовитель	Пределы измерения	Класс точности, % погрешность
Ш1-8	СССР	0,01—1,6 Тл	1,5
Прибор комбинированный Ц4311	СССР	Аксиальные поля 2—20 мТл; радиальные поля 2—2000 мТл	1,0 0,5
Прибор комбинированный цифровой Ц4310	СССР	2—200 мТл	1,5
Прибор комбинированный Ф4300	СССР	20—2000 мТл	1,5
Теслаамперметр Ф4354/1	СССР	150, 300, 600, 1500 мТл	2,5
Миллитесламетр Ф4355	СССР	10—1500 мТл	2,5
Гауссметр модели 110, 240 и 900	США	10^{-5} —3 Тл	1—2,5
Измеритель магнитной индукции тип 1541	ФРГ	10^{-4} —2 Тл	1,0
Гауссметр ETS-63	ПНР	10^{-3} —1 Тл	1—5
Гауссметр «Метра»	ЧССР	0,2—0,5—2 Тл	2,5

цией в усовершенствовании этого класса приборов является увеличение разрешающей способности, уменьшение погрешности, обеспечение не критичности к внешнему сопротивлению. Методы и средства поверки веберметров, выпускаемых из производства и ремонта, нормированы ГОСТ 13001-67 [5-24]. В ряде случаев приборы, основанные на индукционном способе измерения, градуируют в единицах измерения магнитной индукции. Приборы эти, носящие название индукционных тесламетров, широко применяются для измерения индукций постоянных, переменных и импульсных магнитных полей, для измерения градиента неоднородного магнитного поля, намагниченности ферромагнитных материалов.

Гальваномагнитные тесламетры. Широкое распространение в практике магнитных измерений нашли приборы с гальваномагнитными преобразователями Холла. В самом простейшем варианте структурная схема тесламетра представлена на рис. 5-26, где PX — преобразователь Холла, $ИП$ — источник питания, $ИЦ$ — измерительная цепь, $ВП$ — выходной прибор.

Для измерения постоянных магнитных полей обычно PX питается от источника постоянного тока, а измерение ЭДС Холла осуществляется непосредственно с помощью показывающего прибора. Для снижения погрешности измерения магнитной индукции до 0,5—0,1% измерение ЭДС Холла производят потенциометрами. С целью уменьшения температурной погрешности PX изготавливают из материалов со слабой зависимостью постоянной Холла от температуры ($ИпАs$, $ИпАsP$). Применяют также схемы температурной компенсации и термостабильное. Для уменьшения погрешности от нелинейности амплитудной характеристики PX используют компенсаторы с нелинейными элементами. Однако эффективность их низка, если учитывать необходимость смены

Так как гальваномагнитные преобразователи являются малоинерционными приборами (постоянная времени 10^{-8} — 10^{-9} с), их используют в приборах для измерения переменных и импульсных магнитных полей. Для уменьшения паразитных наводок со стороны измеряемого поля PX питают переменным током, частота которого выбирается на порядок выше частоты измеряемой индукции. Наилучшая помехозащищенность достигается, если частота измеряемой индукции имеет строго фиксированное значение. Характеристики тесламетров для измерения индукции переменных полей приведены в табл. 5-20.

Таблица 5-20

Технические характеристики некоторых гальваномagnetных тесламетров для измерения переменных магнитных полей

Наименование прибора	Страна-изготовитель	Пределы измерения	Частотный диапазон	Класс точности, погрешность, %
Ф4356	СССР	0,1—100 мТл	20 Гц—20 кГц	4
Измеритель магнитной индукции	СССР	40, 100, 200 мТл	30 Гц—10 кГц	2,5
Гауссметр, модель 350	США	0,01—0,3 Тл	10 Гц—30 кГц	2
модель 750*	США	10 ⁻⁶ —5 Тл	До 400 Гц	—
модель MG-2A	США	10 ⁻³ —3 Тл	25 Гц—4 кГц	3
модель MG-3A/3D*	США	10 ⁻⁴ —10 Тл	До 400 Гц	3/1
Гауссметр, MM-11*	Япония	0,002—2 Тл	До 500 Гц	1,5

* Приборы используются для измерения индукции как переменных, так и постоянных полей.

Механические тесламетры. Для измерения магнитного поля Земли используются приборы с механическими преобразователями, называемые магнитометрами. Широко известны магнитный компас, теодолиты, магнитная буссоль. Абсолютные магнитные теодолиты применяются для измерения индукций слабых полей. При этом погрешность измерения может быть доведена до сотых долей процента. Гораздо шире используются приборы, основанные на относительных методах измерения: кварцевые и крутильные магнитометры, различного рода магнитные весы. Магнитометры с постоянными магнитами до настоящего времени занимают важное место в магнитоизмерительной технике ввиду большой чувствительности, надежности и возможности использования в полевых условиях (табл. 5-21).

Таблица 5-21

Технические характеристики некоторых магнитометров

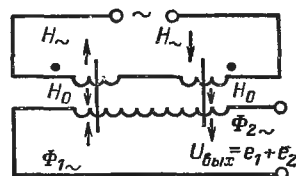
Наименование прибора	Пределы измерения, нТл	Цена деления, нТл	Погрешность отсчета, дел.; измерения, нТл
Магнитометр М-2	16 000	10—80	0,1—0,2 дел
Магнитометр М-14	45 000	10	2—3 нТл
Магнитометр М-14Ф	—	1—2	0,1—0,2 дел
Магнитометр М-18	3000 27 000 (расшир.)	10	3 нТл
Магнитометр М-27	3000 36 000 (расшир.)	10	5 нТл
Магнитометр МА-21	—	(5—7) × 10 ⁻²	0,1—0,2 дел.

Приборы с механическими преобразователями применяются и для измерения переменных магнитных полей (варьометры). Однако в силу большой инерционности первичных преобразователей частотный диапазон измеряемых величин ограничива-

ется единицами герц. Основное применение они нашли для регистрации вариаций элементов земного магнетизма: склонения, составляющих магнитной индукции поля Земли.

Феррозондовые тесламетры. Известно большое количество феррозондовых приборов, измеряющих индукцию магнитного поля или ее приращение. Методы расчета их и особенности применения рассмотрены подробно в [5-13, 5-14]. Наибольшее распространение получили приборы с так называемыми дифференциальными феррозондами продольного возбуждения. На рис. 5-27

Рис. 5-27. Схема соединения обмоток феррозондового преобразователя с продольным возбуждением.



приведена схема соединения обмоток подобного типа феррозондового преобразователя. Обмотки возбуждения соединены последовательно-встречно. При отсутствии измеряемого поля H_0 ЭДС e_1 и e_2 , пропорциональные скорости изменения магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 , возбуждаемых переменным полем H , равны по величине и противоположны по фазе — выходное напряжение $U_{вых}$ равно нулю. В присутствии постоянного измеряемого поля намагничивание материала магнитопроводов происходит по несимметричным циклам и в ЭДС появляются четные гармоники, а на выходе преобразователя получается суммарная ЭДС четных гармоник. Основным источником погрешности здесь является нестабильность нуля приборов, обусловленная наличием гистерезиса и магнитной вязкости при намагничивании материала магнитопроводов. В табл. 5-22 приведены технические характеристики некоторых феррозондовых тесламетров отечественного и зарубежного производства для измерения магнитной индукции постоянных полей.

Таблица 5-22

Технические характеристики некоторых феррозондовых тесламетров

Наименование прибора	Страна-изготовитель	Пределы измерения	Порог чувствительности, погрешность	Смещение нуля
Аэромагнитометр АМ-13	СССР	11 000 нТл	4 нТл	5 нТл/ч
Аэромагнитометр АСГ-46	СССР	6000 нТл	4 нТл	5 нТл/ч
Магнитометр М-17	СССР	50—250—1000—3000—...—6000 нТл	1%	5 нТл/ч
Прибор Г71	СССР	5—10—20 кА/м	1,5%	6 А/м
Магнитометр 1964	Финляндия	2,5—7,5—25—75—250 мкТл	10 нТл	—
Магнитометр MF-1-100	Канада	0,1—0,3—1—3—10—30—100 мкТл	0,5 нТл	—

Анализ работы феррозондовых тесламетров для измерения переменных полей приведен в [5-13]. Отметим некоторые особенности этих приборов: 1) выходной сигнал первичных преобразователей пропорционален значению магнитной индукции, а не ее производной; 2) схемы усиления простые, так как модулированный выходной сигнал преобразователя имеет значительно выше частоту, чем частота измеряемого поля; 3) как следствие п. 2 фазовые искажения минимальны, что повышает устойчивость работы приборов и стабильность чувствительности.

Следует отметить, что из-за неравномерности спектральной плотности шумов феррозондового преобразователя, порог чувствительности приборов для измерения переменного поля ниже, чем у приборов для измерения постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей.

Тесламетры на основе ЯМР. Наибольшую точностью измерения постоянных полей отличаются приборы на основе ЯМР. В геофизической практике широкое применение нашли серийно выпускаемые магнитометры ПМ-1, ПМ-5, М-20. Аналогичные разработки имеются и за рубежом [5-26]. Магнитометры на основе ЯМР используются и как измерители сильных магнитных полей, а также в качестве образцовых при поверке тесламетров более низкого класса точности. В СССР серийно выпускается тесламетр Ш-1 (прежнее название ИМИ-2), структурная схема которого приведена на рис. 5-28. В табл. 5-23 приведены

технические характеристики тесламетров на основе ЯМР.

Устройство для испытания МТМ. Устройство для испытания МТМ при импульсном изменении внешнего поля являются классическими и имеют наиболее высокие точностные показатели. Этим объясняется применение их в области метрологической службы и при точных лабораторных измерениях. Структурная схема установки, рекомендуемой ГОСТ 8.268-77 для исследования образцов, приведена на рис. 5-29. Особенностью схемы является наличие импульсного источника тока для намагничивания испытуемого материала до насыщения и размагничивание его с использованием источника постоянного тока. Наиболее совершенной разработкой рассматриваемого класса устройств является выпускаемая заводом «Точэлектронприбор» измерительная информационная система У5056. Эта система обеспечивает измерение B и H в любой точке кривой размагничивания при импульсном намагничивании и размагничивании плавно изменяющимся полем. Значение отсчитываемых параметров производится с помощью цифровых гистерезисметров Ф5155/1,2. Предельное значение H , кА/м, создаваемое током размагничивания, определяется соотношением

$$H = \frac{2,5 \cdot 10^4}{55 + l},$$

где l — длина зазора для помещения образца, мм.

Таблица 5-23

Технические характеристики магнитометров на основе ЯМР

Наименование прибора	Страна-изготовитель	Пределы измерения	Погрешность, %
Протонный магнитометр ПМ-1	СССР	35 000 — 55 000 нТл	0,001
Протонный магнитометр ПМ-5	СССР	40 000 — 65 000 нТл	0,003
Магнитометр М-20	СССР	35 000 — 70 000 нТл	0,005—0,01
Ш-1 (ИМИ-2)	СССР	0,025 — 2,5 Тл	0,01—0,1
ИМИ-3	СССР	0,05 — 2,75 Тл	0,004—0,3
Магнитометр ЯМ-1	СССР	5·10 ⁻² — 2,5 Тл	0,01
Магнитометр М-49	США	19 000 — 100 000 нТл	—
Протонный магнитометр	Англия	24 000 — 70 000 нТл	0,002
Протонный магнитометр	Япония	30 000 — 58 000 нТл	—
Аэромагнитометр МР-121	Франция	30 000 — 75 000 нТл	—
Магнитометр G502	США	0,0305 — 8,5 Тл	0,001

Погрешность измерения H_c и B_r не превышает 3%. Время измерения одной точки зависимости $B(H)$ менее 30 с.

В настоящее время разработаны устройства с циклическим изменением внешнего перемагничивающего поля и непрерывным измерением магнитной индукции и на-

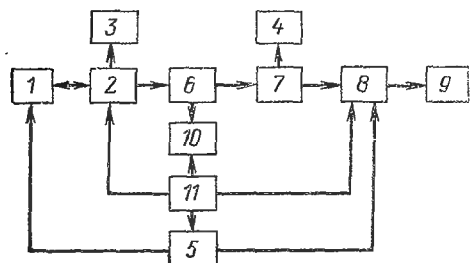


Рис. 5-28. Структурная схема тесламетра Ш1-1.

1 — первичный преобразователь ЯМР; 2 — высокочастотный генератор; 3 — гетеродинный волномер; 4 — осциллограф; 5 — генератор низкой частоты; 6 — детектор; 7 — усилитель; 8 — синхронный детектор; 9 — магнитоэлектрический прибор; 10 — индикатор генерации; 11 — источник питания.

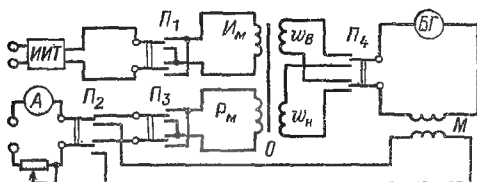


Рис. 5-29. Схема устройства для испытания МТМ при импульсном намагничивании

ИИТ — источник импульсного тока; I_M — импульсная намагничивающая катушка; P_M — размагничивающая катушка; w_B — измерительная катушка индукции; w_N — измерительная катушка напряженности поля; A — амперметр; M — катушка взаимной индуктивности; $BГ$ — баллистический гальванометр; $P_1 - P_4$ — переключатели; O — испытуемый образец.

пряженности поля. Запись результатов производится на самопишущих приборах, электронно-лучевых трубках и в табличной форме. Примерами опытных разработок являются феррометр и компенсационное измерительное устройство НПИ [5-27], магнитоизмерительные системы МЭИ [5-17] и ряд зарубежных приборов и систем [5-26]. В табл. 5-24 приведены технические характеристики ряда устройств для испытания МТМ отечественного и зарубежного производства.

Одним из параметров, характеризующих качество образцов МТМ, является коэрцитивная сила H_c . В зависимости от типа первичного преобразователя, фиксирующего равенство нулю магнитной индукции или намагниченности материала, различают коэрцитиметры с индукционными, ферровзон-

Таблица 5-24

Технические данные некоторых устройств для испытания МТМ

Тип устройства	Страна-изготовитель	Длина образцов, мм	Значения напряженности поля, кА/м	Погрешность, %
У-541	СССР	20—60	$H_c = 10 \div 120$	3
УПМ-68	СССР	40—60	$H_c \leq 250$	3
У5056	СССР	4—100	$H_c = 450$	3
Устройство 3257-3	Япония	10	$H_m = 1200$	—
МН-10	США	2	$H_m = 1680$	1
МН-30	США	6,4	$H_m = 2800$	1
МН-40	США	6,5	$H_m = 2800$	1
МН-50	США	6,4	$H_m = 2800$	1

Таблица 5-25

Технические данные некоторых коэрцитиметров

Тип коэрцитиметра	Страна-изготовитель	Длина образцов, мм	Значения напряженности поля, кА/м	Погрешность, %
У5030	СССР	20—66	$H_c = 400$	4
ИКС-1	СССР	25	$H_c = 400$	1,5
МС-10Д	США	—	$H_m = 800$	1

довыми и гальваномагнитными преобразователями. Схема коэрцитиметра с гальваномагнитными преобразователями Холла приведена на рис. 5-30. Испытуемый обра-

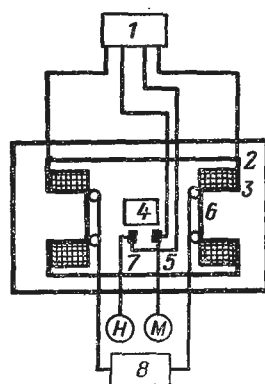


Рис. 5-30. Коэрцитиметр с гальваномагнитными преобразователями.

зец 4 располагается в межполюсном пространстве электромагнита 2. Значение H_c измеряется с помощью преобразователя Холла 7 и выходного прибора H . Индикатором нуля намагниченности является преобразователь Холла 5 и прибор M . Питание

преобразователей осуществляется от источника 1. Намагничивание образца осуществляется с помощью катушек 6, питаемых от генератора одиночных импульсов 8, плавное размагничивание — с помощью катушек 3 от источника 1. На основе этой разработки заводом «Точэлектроприбор» серийно выпускался коэрцитиметр У5030 (табл. 5-25). С техническими характеристиками

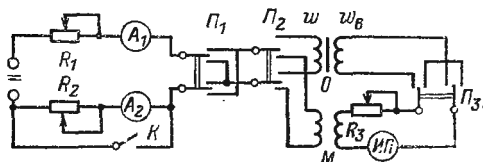


Рис. 5-31. Устройство для определения статических характеристик МММ.

R_1, R_2 — регулировочные реостаты; A_1, A_2 — амперметры; K — ключ; $P_1 - P_2$ — двухполюсные переключатели; w — намагничивающая обмотка; w_6 — измерительная обмотка индукции; M — катушка взаимной индуктивности; R_3 — магазин сопротивлений; $ИП$ — измерительный прибор; O — испытуемый образец.

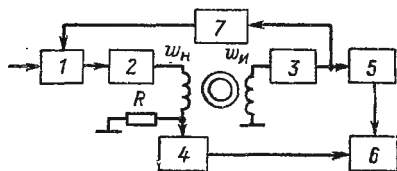


Рис. 5-32. Структурная схема МИС-1Н МЗИ.

1 — задающее устройство; 2 — усилитель мощности; 3, 4 — усилители; 5 — интегратор; 6 — регистрирующий прибор; 7 — звено отрицательной обратной связи; w_H и w_H — измерительная и намагничивающая катушки; R — резистор.

ками опытных образцов коэрцитиметров можно ознакомиться в [5-15].

Обеспечение устройств для контроля постоянных магнитов является обеспечением высокой производительности. Контролируемые параметры, как правило, являются размагничивающий участок петли магнитного гистерезиса или отдельная точка (B_p, H_p), характеризующая состояние магнита, близкое к рабочим условиям. В настоящее время существует большое количество разработок Новочеркасского НИИПМ, Новочеркасского политехнического института, Московского энергетического института, Института электродинамики АН УССР по созданию автоматических устройств для контроля ПМ в серийном производстве. Однако следует заметить, что единой методики до сих пор нет. Поэтому в практике магнитных измерений для указанных целей широко применяют нестандартную аппаратуру [5-15, 5-27].

Устройства для испытания МММ. Для испытания МММ в постоянных полях ГОСТ 15058-69 рекомендует использовать измерительную информационную систему

У5045, принципиальная схема которой приведена на рис. 5-31. Средства измерения, входящие в установку, должны иметь класс точности не ниже 0,2; образцовая катушка взаимной индуктивности должна быть мерой 2-го разряда. В качестве измерителя индукции используется микроверберметр Ф191 или Ф5050. В качестве образцовой катушки взаимной индуктивности используется катушка Р5009, имеющая взаимную индуктивность $M=0,001$ и $0,01$ Гн. Измерителем тока служат приборы М1104 ($0,75-750$ мА; $1,5-30$ А) класса точности 0,2; М17, имеющие внешнее критическое сопротивление $40-250$ Ом, период собственных колебаний $18-20$ с.

Примером реализации метода медленно изменяющегося поля служит установка, представленная на рис. 5-32. Установка предназначена для записи статических петель гистерезиса кольцевых низкокоэрцитивных материалов на двухкоординатном

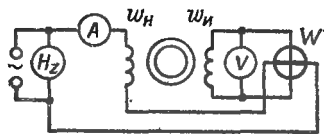


Рис. 5-33. Схема измерения динамических характеристик методом амперметра, вольтметра, ваттметра.

A — амперметр; V — вольтметр; W — ваттметр; H_z — частотомер; w_H и w_H — намагничивающая и измерительная катушки.

самопишущем приборе в режиме постоянного скорости изменения индукции. Точностные показатели установки лежат в пределах $\pm 5\%$. На этом принципе работают установка У5032, внедренная в производство заводом «Точэлектроприбор» [5-27], и ряд зарубежных разработок [5-26].

Для определения магнитных характеристик электротехнических сталей на соответствие ГОСТ серийно выпускается комплектное устройство У5033. Измерения производятся на образцах массой 1 и 10 кг. Для испытания МММ в переменных полях широко распространены устройства, использующие индукционный метод измерения с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра. Схема реализации этого метода приведена на рис. 5-33. Метод нашел отражение в отечественных установках У5018, У5010, УМИПТ-1, УМИПТ-2, У5011, У5034, У5021П, У5021ПМ, У5013. Установка У5018 и У5010 используют одновременно методы амперметра-вольтметра, мостовой и осциллографической. Максимальные значения магнитной индукции и напряженности поля определяются по первым гармоникам указанных величин. Установка У5011 менее точна и универсальна, но обладает простой методикой измерения. Особенностью установок УМИПТ-1 и УМИПТ-2 является возможность измере-

ния средней напряженности поля и мгновенного значения ее. Установки У5033 и У5034 имеют более высокую точность и степень автоматизации процесса испытаний. В установке У5021 параметры материала фиксируются на ленте цифropечатающего механизма. Контроль параметров холоднокатаной рулонной стали в процессе непре-

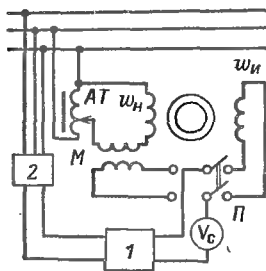


Рис. 5-34. Схема феррометра.

1 — управляемый выпрямитель; 2 — фазовращатель; АТ — автотрансформатор; М — катушка взаимной индуктивности; w_н и w_и — намагничивающая и измерительная катушки; V_с — вольтметр средних значений; П — переключатель.

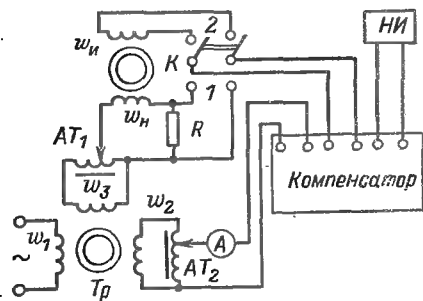


Рис. 5-35. Схема установки для определения характеристик МММ потенциометрическим методом. w₁, w₂ и w₃ — обмотки трансформатора питания; Тр; АТ₁ и АТ₂ — автотрансформаторы; w_н и w_и — намагничивающая и измерительная катушки; R — образцовый резистор; НИ — нуль-индикатор; К — двухполюсный переключатель.

рывного отжига обеспечивает установка У5013. Здесь предусмотрена документальная запись результатов измерения автоматическим потенциометром и световая сигнализация отклонения В и Р от допустимых значений.

Схема реализации феррометрического способа измерения динамических параметров МММ иллюстрируется рис. 5-34. Этот способ лежит в основе установок У542, Ф-2М, Ф-3, Ф5063. Установка У542 измеряет широкий спектр магнитных характеристик, но только на частоте 50 Гц. Хорошей устойчивостью работы и независимостью погрешностей в широком диапазоне частот обладает феррометр Ф-3. Широко распро-

странен в практике магнитных измерений векторметр Ц50, позволяющий снимать динамический цикл перемагничивания с фиксацией B_{max} и H_{max} . Разработанный заводом «Точэлектроприбор» цифровой феррометр Ф5063 снабжен цифropечатающим устройством; имеется возможность представления информации в графическом виде.

Наибольшей точностью обладают потенциометры переменного тока. Отечествен-

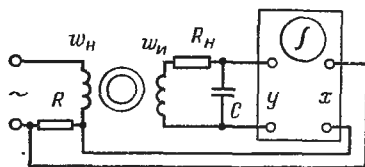


Рис. 5-36. Схема феррографа.

w_н и w_и — намагничивающая и измерительная катушки; R_н и C — интегрирующая цепь; R — образцовый резистор.

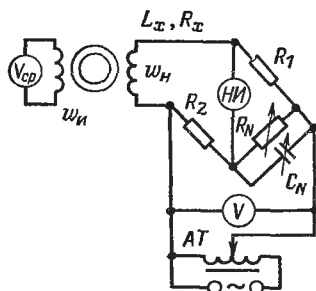


Рис. 5-37. Схема установки для определения характеристик МММ мостовым методом.

АТ — автотрансформатор; L_x и R_x — измеряемые индуктивность и сопротивление; C_н и R_н — уравновешивающие конденсатор и резистор; R₁ и R₂ — резисторы; w_н и w_и — намагничивающая и измерительная катушки; НИ — нуль-индикатор; V и V_{ср} — вольтметры действующего и среднего значения.

ной промышленностью выпускаются установки У55 и У5015. В установке У55 используется прямоугольно-координатный потенциометр. Измерение средних значений ЭДС осуществляется с помощью фазочувствительных приборов. Установка У5015 работает в широком частотном диапазоне (50—8000 Гц). Схема реализации устройств на основе потенциометрического метода приведена на рис. 5-35.

Схемы рис. 5-36 и 5-37 иллюстрируют реализацию феррографического и мостового методов измерений [5-20]. В СССР выпускается устройство с двухлучевым осциллографом ДЭСО-1, являющееся составной частью установок У5010, У5018.

Принцип работы и основные технические характеристики установок У520, У55,

Таблица 5-26

Технические данные некоторых установок для испытания МММ

Тип установки, страна	Частотный диапазон, Гц	Контролируемые параметры и характеристики	Пределы измерения	Погрешность измерения
У5045 (СССР)	0	B_{max} (H_{max}), μ_r нач, μ_r max $B(H)$, B_r , H_c	0,01; 0,1; 1; 10 Тл 0,75 А—15 А для измерения Н	$\gamma_B = \pm 3\%$ $\gamma_H = \pm 3\%$
У5033 (СССР)	50—400	B_{max} (H_{max}), P	В соответствии с ГОСТ 21427.1-75—21427.3-75	$\gamma_H = \gamma_P = \pm 2 \div \pm 5\%$
У5063 (СССР)	25—10 000	$B(H)$, B_{max} , H_{max} , B_r , H_c	0,01; 0,1; 1; 10 В для измерения В 0,01; 0,1; 1; 10 А для измерения Н	$\gamma_B = \pm 0,5\% + 1$ ед. счета $\gamma_H = \pm 1\% + 1$ ед. счета
Ферротестер (Венгрия)	20—1000	B_{max} (H_{max}), B_r , H_c , P	28 000 А/м	$\gamma_B = 5 \div 10\%$; $\gamma_H = 5\%$
SRB-326 (Япония)	50—10 000	$B(H)$, B_{max} , H_{max} , B_r , H_c , P	800 А/м	$\gamma_B = \gamma_H = \pm 3\%$
МН-20 (США)	0,01—10 000	$B(H)$ и ее параметры	24 000 А/м	$\gamma_B = \pm 1\%$; $\gamma_H = \pm 0,5\%$

Таблица 5-27

Цены на некоторые выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью приборы и установки для магнитных измерений

Наименование прибора	Цена
Микроверметр Ф5050	490 руб.
Миллиэсметр Ф4355	100 руб.
Теслаамперметр Ф4354/1	55,8 руб.
Прибор комбинированный Ф4300	200 руб.
Прибор комбинированный П4310	2000 руб.
Прибор комбинированный П4311	1000 руб.
Комплектное устройство У5033	4200 руб.
Измерительная информационная система У5045	2100 руб.
Измерительная информационная система У5056	3000 руб.
Феррометр Ф5063	700 руб.
Установка МН-1020	22 167 голл.
Магнитометр G-502	5700 долл.
Гауссметр MG-2A	793 долл.
Гауссметр MG-3D	1686 долл.
Флюксметр MF-3D	2365 долл.

У542, УМИПТ-1, УМИПТ-2, У5010, У5011, У5017, У5018, ДСШУ-М, У5015, Ф-2М, Ф-3 освещены в [5-20]. В табл. 5-26 приведены технические данные некоторых разработанных в последние годы устройств для испытания МММ отечественного и зарубежного производства.

В табл. 5-27 представлены цены на отечественные и зарубежные приборы, выпускаемые промышленностью в настоящее время.

Список литературы

5-1. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. — Киев: Вища школа, 1976. — 432 с.

5-2. Электрические измерения/Л. И. Байда, Н. С. Добровольский, Е. М. Душин и др. Под ред. А. В. Фремке. — Л.: Энергия, 1973. — 424 с.

5-3. Электрические измерения/К. П. Дьяченко, Д. И. Зорин, П. В. Новицкий и др. Под ред. Е. Г. Шрамкова. — М.: Высшая школа, 1972. — 520 с.

5-4. Справочник по электроизмерительным приборам/К. К. Илюнин, Д. И. Леонтьев, Л. И. Набеева и др. Под ред. К. К. Илюнина. — Л.: Энергия, 1977. — 832 с.

5-5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 576 с.

5-6. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. — Л.: Энергия, 1978. — 262 с.

5-7. Левин М. И., Солодов Ю. С. Теоретические основы информационно-измерительной техники (ч. 1). Конспект лекций. — М.: Изд-во МЭИ, 1975. — 68 с.

5-8. Сегал Б. Н., Семендяев К. А. Пятизначные математические таблицы. — М.: Изд-во АН СССР, 1948.

5-9. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. — М.: Гостехиздат, 1957. — 608 с.

5-10. Основы электроизмерительной техники/М. И. Левин, В. Т. Прытков, Р. М. Демидова-Панферова и др. Под ред. М. И. Левина. — М.: Энергия, 1972. — 544 с.

5-11. ГОСТ 20906-75. Средства измерения магнитных величин, термины и определения.

5-12. Методы ядерного магнитного резонанса/Н. Н. Шумиловский, А. Л. Скрипко, В. С. Король и др. — М.: Л.: Энергия, 1966. — 140 с.

5-13. Афанасьев Ю. В., Студенцов Н. В., Шелкин А. П. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. — Л.: Энергия, 1972. — 272 с.

5-14. Чечурина Е. Н. Приборы для измерения магнитных величин. — М.: Энергия, 1969. — 168 с.

5-15. Февралева Н. Е. Магнитно-твердые материалы и постоянные магниты. Определение характеристик. — Киев, Наукова думка, 1969. — 232 с.

5-16. ГОСТ 15058-69. Материалы магнитомягкие. Методы испытания в постоянных полях.

5-17. Шихин А. Я. Автоматические магнитно-измерительные системы. — М.: Энергия, 1977. — 136 с.

5-18. ГОСТ 18334-73. Материалы магнитомягкие. Методы испытания в диапазоне частот 50 Гц—10 кГц.

5-19. ГОСТ 12119-66. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств.

5-20. Автоматический контроль магнитных параметров/Ю. В. Селезнев, Ю. Н. Маслов, Г. П. Рыжков и др. М.: Высшая школа, 1971. — 288 с.

5-21. ГОСТ 8.268-77. Материалы магнитотвердые литые. Методы определения статических магнитных характеристик образцов.

5-22. ГОСТ 21559-76. Материалы магнитотвердые спеченные. Марки, технические требования и методы контроля.

5-23. Милиц М. Б., Ткаченко А. Н. Магнитно-электрические веберметры. — Л.: Энергия, 1973. — 112 с.

5-24. ГОСТ 13001-67. Веберметры. Методы и средства поверки.

5-25. Хомерики О. К. Применение гальвано-магнитных датчиков в устройствах автоматики и измерений. М.: Энергия, 1971. — 112 с.

5-26. Проспекты фирмы «Walker», 1970.

5-27. Устройства для испытания магнитотвердых материалов. — Киев: Наукова думка, 1971. — 140 с.

Раздел 6

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

- 6-1. Стандартизация и унификация в электротехнической промышленности. Применение государственной системы стандартизации (222). Категории и виды стандартов (223). Унификация электротехнических изделий (224). Аттестация качества электротехнических изделий (225). Применение рядов предпочтительных чисел в электротехнике (228) 222
- 6-2. Главные параметры электрических сетей и присоединяемого к ним оборудования. Общие положения (231). Ряды номинальных постоянного и переменного напряжений (231). Номинальные частоты (232). Ряд номинальных токов (233). Ряды основных параметров электрических машин (233). Номинальные мощности силовых трансформаторов (234). Ряды номинальных линейных размеров (235) 231
- 6-3. Общие требования безопасности и защиты электрооборудования от внешних воздействий. Безопасность электрооборудования (236). Степени защиты электротехнических изделий, обеспечиваемые оболочками (236). Степени защиты электрических машин (237). Степени защиты электрических аппаратов (237). Общие положения о воздействии механических и климатических факторов внешней среды на электротехнические изделия в условиях эксплуатации (238). Технические требования по климатическим воздействиям (239). Технические требования по механическим воздействиям (243). Электротехнические изделия для районов с тропическим и холодным климатом (244). Испытания электротехнических изделий на стойкость к воздействию климатических и механических факторов внешней среды (245) 236

- 6-4. Классификация и кодирование электротехнической продукции 246
- 6-5. Стандартизация терминов, определений и буквенных обозначений. Система стандартизации терминов и определений в электротехнике (247). Буквенные обозначения в электротехнике (248) 247

6-1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УНИФИКАЦИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Применение государственной системы стандартизации

Стандартизация в электротехнической промышленности полностью строится на базе государственной системы стандартизации (ГСС).

В технической нормативной документации электротехнической промышленности нашли применение все категории и виды стандартов, предусмотренные в государственной системе стандартизации. Основой нормативно-технической документации в

отрасли являются государственные стандарты.

В электротехнической промышленности сложилась система стандартизации, заключающаяся в том, что стандарты всех подотраслей электротехники (их более 30) основываются на общих стандартах для всего машиностроения (предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел, допуски и посадки, номенклатура и характеристики основных показателей надежности и др.) и на общих стандартах для всей электротехники (номинальные напряжения, номинальные частоты, нормы качества электроэнергии у ее приемников, условия эксплуатации электрооборудования в части воздействия климатических и механических факторов внешней среды, а также в районах с холодным или тропическим климатом,

стандарты на термины и определения, относящиеся ко всей электротехнике, и на буквенные обозначения основных величин в электротехнике).

Кроме того, в основу стандартизации продукции большинства подотраслей электротехнической промышленности — электрических машин, трансформаторов, электрических аппаратов, источников света и многих других — положены базовые стандарты, общие для всей подотрасли; так, например, для электрических машин имеется стандарт (ГОСТ 183-74), устанавливающий общие технические требования на все электрические машины; имеются и другие стандарты, устанавливающие общие нормы для всех машин. На основе единых общих стандартов для изделий всей подотрасли утверждаются стандарты на отдельные серии изделий данной подотрасли, например на асинхронные электродвигатели, синхронные и др. При этом одновременно производится унификация узлов и деталей для данной серии электроизделий. Кроме того, устанавливаются определенная комплексность и последовательность стандартизации изделий, комплектующих элементов для них и материалов.

Подобным образом построена стандартизация в остальных подотраслях электротехники — в трансформаторостроении, электроаппаратостроении, в светотехнике и др.

Категории и виды стандартов

В соответствии с ГОСТ 1.0-68 установлено, что стандарты СССР подразделяются на следующие категории:

государственные стандарты Союза ССР (ГОСТ);

отраслевые стандарты (ОСТ);

республиканские стандарты (РСТ);

стандарты предприятий (СТП).

Стандарты в Советском Союзе являются обязательными в пределах установленной сферы их действия, области и условий их применения.

Государственные стандарты устанавливаются преимущественно на продукцию массового и крупносерийного производства, на изделия и продукцию, имеющие важное народнохозяйственное значение, и другие объекты, установление которых необходимо для обеспечения оптимального качества продукции, единства и взаимосвязи различных областей науки, техники производства, культуры и др.

Отраслевые стандарты устанавливают требования к продукции, не относящейся к объектам государственной стандартизации, к технологической оснастке, инструменту, специфическим для отрасли, технологические нормы и типовые технологические процессы отраслевого применения, а также нормы, правила, требования, термины и обозначения, необходимые для обеспечения взаимосвязи в производственно-технической деятельности предприятий и организаций отрасли.

Кроме того, в отраслевых стандартах устанавливаются основные положения и требования в области организации производства и управления качеством продукции, нашедшие широкое применение в последнее время.

Порядок разработки и утверждения государственных и отраслевых стандартов установлен в ГОСТ 1.2-68.

Республиканские стандарты устанавливают требования к продукции, выпускаемой предприятиями союзного, республиканского и местного подчинения; за исключением продукции, относящейся к объектам государственной или отраслевой стандартизации. Номенклатура продукции, на которую утверждают республиканские стандарты, согласовываются с Госстандартом СССР и с соответствующими ведущими министерствами (ведомствами) СССР по закрепленным группам продукции.

Порядок разработки и утверждения республиканских стандартов союзных республик установлен в ГОСТ 1.3-68.

Стандарты предприятий (объединений) устанавливают нормы, правила, требования, методы и другие объекты стандартизации, применяемые только на данном предприятии в данном объединении.

В частности, объектами стандартизации на предприятии могут быть:

детали и сборочные единицы, являющиеся составными частями изделий;

технологическая оснастка и инструмент, технологические нормы, требования и типовые технологические процессы и др.

На поставляемую продукцию стандарты предприятий (объединений) не утверждаются, и в конструкторской документации основного производства не допускается давать ссылку на стандарты предприятий (объединений).

Порядок разработки и утверждения стандартов предприятий устанавливается ГОСТ 1.4-68.

Основные требования к построению, содержанию и изложению стандартов установлены в ГОСТ 1.5-68.

Кроме приведенных категорий стандартов в электротехнической и в других отраслях промышленности утверждаются технические условия (ТУ), представляющие собой распространенный вид нормативно-технической документации. Общий порядок согласования, утверждения и государственной регистрации ТУ на изделия, материалы, вещества и другую продукцию общепромышленного применения и народного потребления всех отраслей народного хозяйства, кроме продукции оборонного назначения, установлен ГОСТ 2.115-70.

Построение, изложение и оформление технических условий осуществляются в соответствии с правилами, установленными ГОСТ 2.114-70.

Понятие «вид стандарта» определяет содержание стандарта в зависимости от его назначения.

Стандарты всех категорий на продукцию согласно ГОСТ 1.0-68 подразделяются на виды:

- стандарты технических условий (общих технических условий);
- стандарты общих технических требований (технических требований);
- стандарты параметров и (или) размеров;
- стандарты типов, основных параметров и (или) размеров;
- стандарты конструкций и размеров;
- стандарты марок;
- стандарты сортамента;
- стандарты правил приемки;
- стандарты методов контроля (испытаний, анализа, измерений);
- стандарты правил маркировки, упаковки, транспортирования и хранения;
- стандарты правил эксплуатации и ремонта;
- стандарты типовых технологических процессов.

В стандартах любых видов, если это вызвано спецификой продукции, должны быть отражены требования безопасности труда.

В стандартах допускается предусматривать данные, свойственные стандартам нескольких видов, например стандартов правил приемки и методов контроля, стандарта технических требований, маркировки, упаковки, транспортирования и хранения.

Унификация электротехнических изделий

Электротехнические изделия, как известно, применяются во всех отраслях народного хозяйства, они должны удовлетворять особенностям каждой из этих отраслей техники — отсюда и колоссальная номенклатура различных видов этих изделий.

При многообразной номенклатуре изделий электротехнической промышленности и большом количестве исполнений особое значение имеют проводимые в отрасли работы по унификации, являющейся наиболее эффективным средством осуществления стандартизации, сокращения номенклатуры выпускаемых изделий, необходимой предпосылкой для организации специализированных производств.

Под унификацией понимают рациональное сокращение числа типов, видов и размеров изделий одинакового функционального назначения, а также узлов и деталей, входящих в них, создание комплексов ограниченного числа взаимозаменяемых узлов и деталей, с тем чтобы из них на основе базовой модели или самостоятельно, путем различных сочетаний, можно было собрать требуемые машины, механизмы, аппараты, приборы и различные устройства с добавлением некоторого ограниченного количества специальных (оригинальных) узлов и деталей.

Одним из основных этапов работ по унификации является выбор объектов уни-

фикации и разработка заданий по установлению уровня унификации основного и вспомогательного производства в пределах предприятия (объединения) подотрасли или отрасли в целом.

Унификация машин, аппаратов, приборов, устройств и т. д. одинакового функционального назначения основана на применении одной базовой модели для построения ряда однотипных изделий с различными основными параметрами.

Выбор объектов унификации электротехнических изделий базируется на анализе основных параметров, которым они должны соответствовать, выявлении общих из них и на разработке единых серий электротехнического оборудования (электрических машин, трансформаторов, электрических аппаратов) с характеристиками, удовлетворяющими требованиям как можно большего числа отраслей народного хозяйства. На базе основного исполнения единых серий разрабатываются специализированные исполнения, например для химической промышленности, для работы в тропических условиях и т. д. При этом одновременно проводится максимальная унификация узлов сборочных единиц и деталей, применяемых в единых сериях.

Работы по унификации позволяют сократить срок и затраты на новые разработки, сократить цикл производства, повысить технологический уровень производства, сократить номенклатуру технологической оснастки и мерительного инструмента.

Унификация параметров, размеров, конструкций, широко применяемая при проектировании принятых в отрасли серий наиболее массовых видов изделий, позволяет из ограниченного числа унифицированных взаимозаменяемых сборочных единиц и деталей создавать большое количество исполнений. Примером применения такого вида унификации могут служить серии А2 и АО2 асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100 кВт по ГОСТ 13859-68 и заменяющая их серия 4А по ГОСТ 19523-74. Так, в серии А2 и АО2 предусмотрено 72 тысячи типоразмеров двигателей, изготовляемых в девяти габаритах, с использованием 64 станин, 40 подшипниковых щитов, 42 исполнений валов, 26— роторов, 79— пакетов ротора и столько же статора, 29— листов статора и 60— листов ротора.

Примером размерной унификации может служить унификация и на ее основе стандартизация основных установочно-присоединительных размеров электрических машин; форм исполнений и их условных обозначений, высот осей вращения, концов электрических валов и присоединяемых к ним неэлектрических машин, конструкций и размеров мест крепления, допусков на установочно-присоединительные размеры (ГОСТ 12126-71; ГОСТ 18709-73 и др.).

В результате этой работы резко снижается количество типоразмеров элементов конструкций электрических машин и соответственно применяемой при их изготовлении

технологической оснастки; повышена их взаимозаменяемость, качество и надежность изделий, а также конкурентоспособность на внешнем рынке.

Применение метода унификации позволяет:

значительно уменьшить объем конструкторских работ и сроки проектирования; снизить стоимость и сократить сроки освоения производства новых изделий;

повысить уровень механизации и автоматизации производственных процессов, снизить трудоемкость и повысить производительность труда путем организации специализированных производств;

обеспечить большую гибкость и мобильность производства при переходе на выпуск новых изделий;

повысить качество выпускаемой продукции, надежность и долговечность путем тщательной отработки унифицированных конструкций изделий и технологии их изготовления;

облегчить эксплуатацию, обслуживание и ремонт.

Оценку уровня унификации изделий производят по количеству, массе и трудоемкости унифицированных деталей, отнесенных к общим количеству деталей, массе и трудоемкости изделия в целом.

1. Коэффициент унификации по количеству деталей

$$K_{y,d} = \Sigma УД / \Sigma Д,$$

где $\Sigma УД$ — количество унифицированных деталей в изделии; $\Sigma Д$ — общее количество деталей в изделии.

2. Коэффициент унификации по массе деталей

$$K_{y,m} = \Sigma УМ / \Sigma М,$$

где $\Sigma УМ$ — масса унифицированных деталей; $\Sigma М$ — общая масса изделия.

3. Коэффициент унификации по трудоемкости

$$K_{y,t} = \Sigma УТ / \Sigma Т,$$

где $\Sigma УТ$ — трудоемкость изготовления унифицированных деталей; $\Sigma Т$ — общая трудоемкость изготовления изделия.

Под термином «унифицированные детали» в данном случае подразумевается сумма стандартизованных, заимствованных и покупных деталей.

Существенный недостаток каждой из приведенных формул — односторонняя характеристика степени унификации изделия. Более полную характеристику степени унификации изделия можно получить с помощью комплексного показателя, отражающего характерные стороны унификации изделия. Такой комплексный коэффициент степени унификации можно представить в следующем виде:

$$K = \frac{\Sigma УМ \cdot C_{y,m} + \Sigma УТ \cdot h}{\Sigma М \cdot C_m + \Sigma Т \cdot h},$$

где $C_{y,m}$ — средняя стоимость единицы массы унифицированных деталей в изделии;

C_m — средняя стоимость единицы общей массы изделия; h — средняя стоимость одного нормо-часа.

Таким образом, K — отношение части производственных затрат на изготовление унифицированных деталей к производственным затратам на изготовление всего изделия.

По состоянию на 1978 г. в электротехнической промышленности действует более 100 государственных стандартов на параметрические ряды и, кроме того, значительное число отраслевых стандартов, решающих задачи унификации.

В процессе стандартизации электротехнических изделий одновременно решаются вопросы унификации параметров, маркоразмеров и др. Так, введение ГОСТ 5008-60 «Кабели дальней связи низкочастотные» позволило снизить количество маркоразмеров с 1381 до 292, а при пересмотре его в 1975 г. была проведена дальнейшая унификация маркоразмеров.

В электротехнической промышленности определены группы и виды изделий, которые в наибольшей степени обеспечивают эффективность унификации изделий.

Большое значение имеет унификация материалов, комплектующих изделий. Известно, что многообразие материалов осложняет организацию производства, снижает серийность, увеличивает себестоимость. Поэтому одновременно со стандартизацией и унификацией готовых изделий проводится также и сокращение типоразмеров применяемых материалов и конструктивных элементов.

Аттестация качества электротехнических изделий

В комплексе мер по повышению качества продукции аттестация стала одним из постоянно действующих факторов.

В «Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы» в продолжение и развитие этой задачи указано: «Повысить удельный вес продукции высшей категории качества в общем объеме ее выпуска».

Опыт проведения в Советском Союзе государственной аттестации качества промышленной продукции подтвердил эффективность этой меры, направленной на дальнейшее расширение производства промышленной продукции наиболее высокого качества.

С 1966 г. в электротехнической промышленности проводится работа по аттестации качества электротехнических изделий, а с 1967 г. — по присвоению государственного Знака качества. В числе первых в СССР государственный Знак качества был присвоен в 1967 г. четырем исполнениям асинхронных электродвигателей Московского электромеханического завода имени Владимира Ильича.

При организации аттестации электротехнических изделий Министерство

электротехнической промышленности руководствуется «Основными положениями о порядке аттестации продукции машиностроения и других отраслей промышленности, утвержденными Госстандартом СССР, ГКНТ и Госпланом СССР 17 июня 1974 г., «Общими методическими указаниями. Порядок аттестации промышленной продукции» (ОМУ28-74) и «Методическими указаниями. Порядок аттестации продукции машиностроения» (МУ28-74), утвержденными Госстандартом СССР.

На основе указанной документации Минэлектротехпромом утверждена и согласована с Госстандартом СССР «Инструкция о порядке аттестации продукции предприятий Министерства электротехнической промышленности» (РТС 16.690.050-74). Кроме того, в Минэлектротехпроме действуют четыре основополагающих отраслевых документа, устанавливающих номенклатуру показателей, качества продукции, общих для всей электротехнической продукции. В них сформулированы требования, которыми должны руководствоваться при разработке подотраслевых нормативно-технических документов, которыми регламентируются дополнительные нормы и требования по оценке качества продукции при ее аттестации, связанные со спецификой конкретных электротехнических изделий (таких подотраслевых нормативно-технических документов в отрасли насчитывается более 100).

Этими документами установлено, что аттестация электротехнических изделий предусматривает проведение комплекса организационно-технических и экономических мероприятий, направленных на своевременное внедрение в производство научно-технических достижений и планомерное повышение качества выпускаемой продукции.

Основными задачами аттестации являются:

- увеличение объемов производства продукции, соответствующей лучшим отечественным и мировым достижениям или превосходящей их, для полного удовлетворения потребностей народного хозяйства и населения страны;

- расширение производства прогрессивных конкурентоспособных машин, оборудования и приборов;

- ускорение модернизации или снятие с производства устаревшей продукции.

Аттестация продукции является основой для:

- планирования объемов производства продукции по категориям качества;

- повышения технического уровня и качества продукции;

- оценки деятельности предприятия, объединения, отрасли в повышении технического уровня и качества продукции;

- стимулирования преимущественного производства продукции с государственным Знаком качества.

Аттестации подлежит вся продукция, определяющая профиль министерства и ве-

домства, и другая продукция, постоянно выпускаемая подведомственными всесоюзными промышленными объединениями, производственными объединениями, предприятиями и организациями.

Аттестации подвергаются также уникальные изделия, имеющие важное значение в народном хозяйстве, например турбогенераторы, гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и др.

Важное значение имеет аттестация комплектов изделий и сборочных единиц, существенно влияющих на качество конечной продукции и поставляемых предприятиями-смежниками, она должна предшествовать, как правило, аттестации конечной продукции.

Аттестация продукции, выпускаемой производственными объединениями, предприятиями и организациями, проводится государственными аттестационными комиссиями по трем категориям качества: высшей, первой и второй.

Продукция высшей категории качества должна по технико-экономическим показателям соответствовать лучшим отечественным и мировым достижениям или превосходить их, быть конкурентоспособной на внешнем рынке, иметь повышенные стабильные показатели качества, соответствовать стандартам (техническим условиям), учитывающим требования международных стандартов, обеспечивать экономическую эффективность и удовлетворять потребности народного хозяйства и населения страны. К продукции высшей категории качества относится продукция, на которую Госстандартом СССР зарегистрировано решение Государственной аттестационной комиссии и выдано свидетельство о присвоении продукции государственного Знака качества. Вся продукция высшей категории качества должна выпускаться в полном объеме плана производства и обозначаться государственным Знаком качества в соответствии с ГОСТ 1.9-67.

Продукция первой категории качества по технико-экономическим показателям должна соответствовать современным требованиям стандартов (технических условий) и удовлетворять потребности народного хозяйства и населения страны.

Ко второй категории качества относится продукция, которая по технико-экономическим показателям не соответствует современным требованиям народного хозяйства и населения страны, морально устарела и подлежит модернизации или снятию с производства.

Срок снятия этой продукции с производства или модернизации устанавливает министерство-изготовитель продукции по согласованию с министерством-заказчиком продукции и Госпланом СССР.

Срок действия стандартов на продукцию второй категории качества в соответствии с утвержденным сроком снятия ее с производства устанавливает организация, утвердившая эти стандарты по представлению

министерства—изготовителя продукции после согласования с Госстандартом СССР.

Разработка и проведение мероприятий по подготовке продукции к аттестации возложена на производственные объединения, предприятия и организации и проводится в соответствии с планами аттестации продукции.

Для этой цели проводится следующий комплекс мероприятий по повышению качества выпускаемой продукции: проведение систематической оценки технического уровня и качества изделий в сопоставлении с лучшими отечественными и зарубежными образцами; совершенствование конструкции, технологии изготовления, методов контроля и испытаний; обеспечение взаимовыязанных требований к качеству сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий; проведение работ по комплексной механизации, автоматизации производства; проведение мероприятий по метрологическому обеспечению на предприятии; обеспечение стабильности показателей качества продукции; повышение уровня специализации производства; проведение комплекса работ по стандартизации и соблюдению действующих стандартов; проведение сбора и анализа показателей качества продукции по данным эксплуатации; определение оптимальной потребности в запасных частях на установленный ресурс изделия; внедрение на предприятии единых межотраслевых систем ЕСКД, ЕСТД, ЕСТП, ССБТ и др.; проведение заводской аттестации качества деталей, сборочных единиц, производимых предприятием для комплектации продукции собственного производства, и ряда других мероприятий, предусмотренных государственной, отраслевой нормативно-технической документацией по аттестации качества продукции и стандартами предприятий по управлению качеством выпускаемой продукции.

К основополагающей документации отраслевого значения по оценке качества продукции при ее подготовке к аттестации относятся руководящие технические материалы РТМ 16.690.051-75 «Карта технического уровня и качества продукции. Правила применения»; РТМ 16.800.329-75 «Методика применения экспертного метода для оценки качества электротехнической продукции», РТМ 16.690.052-75 «Оценка уровня качества электротехнической продукции», а также РТМ 16.800.300-76 «Товары народного потребления. Комплексная оценка уровня качества. Общие положения».

Кроме обычных методов установления уровня качества продукции при ее аттестации в отрасли пользуются методом сравнения аттестуемого изделия с базовым образцом — эталоном, представляющим собой не изделие, а нормативный документ, в котором установлен перечень базовых значений показателей качества (базовый показатель качества продукции согласно ГОСТ 15467-70 — это показатель качества продукции, принятой за исходную при сравнительных оценках качества).

Базовый образец — эталон определяется на основе анализа технико-экономического уровня качества изготовления лучших отечественных и зарубежных аналогов оцениваемой продукции с учетом перспектив технического прогресса, требований перспективных опережающих стандартов и потребностей народного хозяйства в продукции определенного уровня качества. Базовые показатели качества согласовываются с потребителем и срок их действия устанавливается не более трех лет.

Важное значение в оценке качества при аттестации изделий имеет применение совершенных современных технологических процессов производства и стабильность их при изготовлении аттестуемой продукции. В связи с этим в отрасли утверждены отраслевой стандарт по аттестации производства ОСТ 16.0.636.490-77 «Отраслевая система аттестации производства предприятий. Основные положения», которым установлены единые принципы аттестации производства предприятий.

Для оценки уровня аттестуемых производств приняты три категории: высшая, первая и вторая и для каждой из них установлены соответствующие требования и характеристики. Аттестация производства проводится на каждом предприятии раз в три года.

Если уровень производства аттестован по второй категории, предприятие лишается права выпускать продукцию с государственным Знаком качества. Карта технического уровня продукции такого предприятия не согласовывается и не регистрируется. Производство, аттестованное по второй категории, подлежит техническому перевооружению или реконструкции.

Руководство работой по аттестации продукции, выпускаемой производственными объединениями, предприятиями, организациями, входящими в систему министерств СССР, осуществляется этими министерствами.

Руководство работой по аттестации продукции, выпускаемой республиканскими промышленными и производственными объединениями, предприятиями, организациями, входящими в систему республиканских министерств, осуществляется советами министров союзных республик или по их поручению соответствующим министерством.

Госстандарт СССР в соответствии с Положением о Государственном комитете стандартов:

организует работу по аттестации продукции в стране;

разрабатывает и утверждает общие методические указания о порядке проведения аттестации продукции и осуществлении контроля за соблюдением условий аттестации; осуществляет методическое руководство и координацию деятельности министерств (ведомств) в области аттестации продукции; регистрирует решения государственных аттестационных комиссий о присвоении продукции государственного Знака качества;

контролирует правильность проведения министерствами работ по аттестации продукции;

рассматривает совместно с министерствами возникающие между ними разногласия по вопросам аттестации продукции и принимает по ним решения;

заслушивает сообщения представителей министерств (ведомств), руководителей головных и базовых организаций по стандартизации, а также руководителей предприятий и организаций о ходе работ по аттестации;

лишает предприятия права применять государственный Знак качества при нарушении условий аттестации или ухудшении качества аттестованной продукции.

Состав государственных аттестационных комиссий утверждается министром (руководителем ведомства).

В состав комиссии включают по одному квалифицированному специалисту от:

министерства (являющегося ведущим в производстве аттестуемой продукции);

министерства-изготовителя аттестуемой продукции;

Госстандарта СССР;

Государственного комитета Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий;

Министерства внешней торговли;

Министерства торговли СССР (при аттестации товаров народного потребления).

Председателем государственной аттестационной комиссии назначается, как правило, специалист министерства (ведомства)-заказчика (основного потребителя) или Госстандарта СССР.

Как правило, аттестационная комиссия проводит свою работу непосредственно на производственном объединении, предприятии или в организации-изготовителе аттестуемой продукции.

Государственная аттестационная комиссия проверяет соответствие технического уровня и качества продукции, условий ее производства и обеспечения стабильности качества требованиям, предъявляемым к продукции соответствующей категории качества, и правильность оформления материалов, представляемых на аттестацию.

Государственная аттестационная комиссия принимает решение в полном составе. Решение считается принятым, если за него проголосовало не менее 75% членов комиссии, в том числе специалисты министерства (ведомства)-заказчика (основного потребителя) и Госстандарта СССР.

Члены государственной аттестационной комиссии в соответствии с действующими положениями несут персональную ответственность за объективность принимаемых решений и обоснованность присвоения аттестуемой продукции соответствующей категории качества.

Государственная аттестационная комиссия принимает решение об отнесении продукции к высшей или первой категориям качества на следующие сроки:

для продукции производственно-технического назначения — до трех лет;

для товаров народного потребления — до двух лет.

Установленный срок действия категорий качества не может превышать срока действия стандартов (технических условий), по которым выпускается аттестуемая продукция.

Очередная переаттестация продукции проводится до истечения срока действия категории качества.

Решения государственных аттестационных комиссий подлежат обязательной регистрации: по продукции высшей категории качества — в Госстандарте СССР, по продукции первой и второй категорий качества — в министерстве (ведомстве)-изготовителе.

В десятой пятилетке в электротехнической промышленности продолжают совершенствоваться организационные формы, методическая нормативно-техническая документация и экономическое стимулирование повышения качества продукции. В народнохозяйственные планы отрасли (пятилетние и годовые) вводятся (в разделе новой техники) в числе основных показателей производственно-хозяйственной деятельности показатель удельного веса продукции высшей категории качества в общем объеме продукции, подлежащей аттестации.

Министерство устанавливает главным производственным управлениям, а последним своим предприятиям на пятилетний период и раздельно по годам задания по повышению удельного веса выпускаемой продукции высшей категории и по снижению удельного веса продукции второй категории.

Экономическое стимулирование предусматривает поощрение предприятий, обеспечивающих систематическое и планомерное повышение качества продукции и санкции для предприятий, которые не уделяют должного внимания этим вопросам. Размер увеличения или уменьшения фондов экономического стимулирования рассчитывается в соответствии с разработанными министерством шкалами.

Применение рядов предпочтительных чисел в электротехнике

Систему предпочтительных чисел при стандартизации основных параметров и числовых характеристик различных элементов электрооборудования стали применять сравнительно давно. Применение этой системы, базирующейся на предпочтительных числах и рядах предпочтительных чисел, позволяет увязать между собой элементы, входящие в электрические установки и устройства, по номинальным напряжению, мощности, току и другим числовым характеристикам, установленным по строго определенному ряду.

На ранней стадии стандартизации электрооборудования при установлении параметров и размеров прибегали к рядам

предпочтительных чисел, построенным на арифметической прогрессии.

Практика показала, что наиболее удобными и отвечающими требованиям большей равномерности являются ряды предпочтительных чисел, построенные на геометрической прогрессии.

Каждый член геометрической прогрессии является произведением предыдущего члена и постоянного для данного ряда знаменателя прогрессии: $a, ax, ax^2, \dots, ax^{(n-1)}$.

Наиболее удобной является геометрическая прогрессия, включающая число 1 и имеющая знаменателем корень из 10:

$$\varphi = \sqrt[n]{10}.$$

Для удовлетворения нужд различных подотраслей электротехнической промышленности при выборе основных параметров оказалось достаточным иметь четыре десятичных ряда геометрической прогрессии, имеющих знаменатели (φ):

Обозначение ряда	Знаменатель ряда	Количество членов в пределах десятичного ряда
R5	$\varphi_5 = \sqrt[5]{10} = 1,6$	5
R10	$\varphi_{10} = \sqrt[10]{10} = 1,25$	10
R20	$\varphi_{20} = \sqrt[20]{10} = 1,12$	20
R40	$\varphi_{40} = \sqrt[40]{10} = 1,06$	40

Число в обозначении ряда представляет собой степень корня из 10 и одновременно показывает количество членов в пределах ряда от 1 до 10 (исключая 10), например, R*n* имеет знаменатель ряда $\varphi_n = \sqrt[n]{10}$ и *n* членов в пределах ряда, т. е. в ряде R10 знаменатель равен $\sqrt[10]{10}$, а количество членов равно 10.

Каждый ряд построен на определенном знаменателе прогрессии $\varphi_5, \varphi_{10}, \varphi_{20}, \varphi_{40}$, в интервале от 1 до 10. Числа свыше 10 получают умножением на 10; 100; 1000 и т. д., а числа, меньшие 1, — умножением на 0,1; 0,01; 0,001 и т. д.

Последующий ряд чисел со знаменателем, равным корню квадратному из знаменателя предыдущего ряда $\varphi_{40} = \sqrt[40]{10} = \sqrt[20]{\sqrt[20]{10}} = \sqrt[40]{10} = 1,059$ (с округлением $\varphi_{40} = 1,06$), удваивает число членов в пределах ряда, т. е. 40 вместо 20.

Произведение, частное, степень, образующие с применением предпочтительных чисел, дают также предпочтительные числа.

Примеры обозначения рядов предпочтительных чисел:

а) обозначения рядов, не ограниченных пределами:

R5; R10; R20; R40;

б) обозначения рядов с ограниченными

пределами или обязательными числами: R5 (...40...) — основной ряд R5, не ограниченный верхним или нижним пределами, но с обязательным включением числа 40;

R10 (1,25...) — основной ряд R10, ограниченный числом 1,25 в качестве нижнего предела;

R20 (...45) — основной ряд R20, ограниченный числом 45 в качестве верхнего предела;

R40 (75...300) — основной ряд R40, ограниченный числом 75 в качестве нижнего предела и числом 300 в качестве верхнего предела.

По предпочтительным числам и геометрическим рядам предпочтительных чисел в настоящее время построены ряды мощностей электродвигателей, силовых трансформаторов и автотрансформаторов, номинальные токи электрических аппаратов, номинальные сечения части электрических проводов и т. д. Основные ряды предпочтительных чисел, установленные ГОСТ 8032-56, приведены в табл. 6-1.

В стандарте указано, что при выборе рядов для тех или иных параметров, размеров и других числовых характеристик следует предпочитать менее частый (с большим знаменателем прогрессии) более частому (с меньшим знаменателем), т. е. R5 — ряду R10; R10 — ряду R20; R20 — ряду R40.

В табл. 6-1 приведены значения основных рядов R5, R10, R20 и R40; так называемые порядковые номера предпочтительных чисел значительно облегчают их умножение, деление, возведение в степень и извлечение из них корня. Требуется, например, перемножить предпочтительные числа 1,25 на 1,60 — для этого складывают их порядковые номера (4+8); сумма которых соответствует порядковому номеру (12) предпочтительного числа 2,00, являющегося произведением 1,25 на 1,60. Требуется разделить предпочтительное число 6,00 на 1,50 — для этого вычитаем из большего порядкового числа меньшее (31-7), разность порядковых номеров (24) соответствует порядковому номеру предпочтительного числа 4,00, являющегося частным 6:1,5.

При необходимости в более частом ряде в стандарте установлен ряд геометрической прогрессии с знаменателем $\varphi_{80} = 1,03$. При этом в стандарте указано, что дополнительный ряд R80 следует применять как исключение.

Дополнительный ряд предпочтительных чисел, установленный в стандарте, приведен в табл. 6-2.

Кроме основных и дополнительного рядов предпочтительных чисел, указанных в табл. 6-1 и 6-2, допускается применять производные ряды, получаемые из основных или дополнительного рядов путем отбора каждого 2, 3, 4-го или *n*-го числа основного или дополнительного ряда. Производные ряды чисел применяют в тех случаях, когда устанавливаются градации параметров, размеров и другие числовые характеристики.

Таблица 6-1

Основные ряды				Номер предпоч- титель- ного чис- ла
R5	R10	R20	R40	
1,00	1,00	1,00	1,00	0
		1,12	1,06	1
		1,25	1,12	2
		1,40	1,18	3
			1,25	4
			1,32	5
			1,40	6
1,60	1,60		1,50	7
		1,60	1,60	8
		1,80	1,70	9
		2,00	1,80	10
		2,20	1,90	11
		2,40	2,00	12
		2,60	2,12	13
2,50	2,50		2,24	14
		2,50	2,36	15
		2,80	2,50	16
		3,15	2,65	17
		3,55	2,80	18
			3,00	19
			3,15	20
4,00	4,00		3,35	21
		4,00	3,55	22
		4,50	3,75	23
		5,00	4,00	24
		5,60	4,25	25
		6,00	4,50	26
			4,75	27
6,30	6,30		5,00	28
		6,30	5,30	29
		7,10	5,60	30
		8,00	6,00	31
		9,00	6,30	32
		9,50	6,70	33
			7,10	34
10,00	10,00		7,50	35
		10,00	8,00	36
			8,50	37
			9,00	38
			9,50	39
			10,00	40

Таблица 6-2

Дополнительный ряд R80

1,00	1,32	1,80	2,36	3,15	4,25	5,60	7,50
1,03	1,36	1,85	2,43	3,25	4,37	5,80	7,75
1,06	1,40	1,90	2,50	3,35	4,50	6,00	8,00
1,09	1,45	1,95	2,58	3,45	4,62	6,15	8,25
1,12	1,50	2,00	2,65	3,55	4,75	6,30	8,50
1,15	1,55	2,06	2,72	3,65	4,87	6,50	8,75
1,18	1,60	2,12	2,80	3,75	5,00	6,70	9,00
1,22	1,65	2,18	2,90	3,87	5,15	6,90	9,25
1,25	1,70	2,24	3,00	4,00	5,30	7,10	9,50
1,28	1,75	2,30	3,07	4,12	5,45	7,30	9,75

ки, зависящие от параметров и размеров, образованных на базе основных рядов.

В обозначения производных рядов должны входить: обозначения основного или дополнительного ряда (R5, R10, R20, R40 или R80), из которого составлен производный ряд, наклонная разделительная черта, цифра, указывающая, что производный ряд образован из основного ряда путем отбора каждого 2, 3, 4, ..., n -го числа, а также числа, ограничивающие производный ряд (в скобках),

Примеры обозначения производных рядов:

R5/2 (1...1 000 000 — производный ряд, полученный из каждого второго числа основного ряда R5 и ограниченный числами 1 и 1 000 000);

R10/3 (...80...) — производный ряд, полученный из каждого третьего числа основного ряда R10, включающий число 80 и не ограниченный в обоих направлениях.

Если при установлении градаций параметров и размеров изделий требуется в различных диапазонах ряда иметь неодинаковую относительную разность между числами, то необходимо подобрать наиболее подходящий основной ряд для каждого интервала таким образом, чтобы последовательности числовых значений образовывали сочетание рядов с различными знаменателями, допускающими дополнительные интерполяции (сложные ряды).

При выборе того или иного числового значения необходимо брать один из членов основных рядов R5, R10, R20, R40 или в крайнем случае, член дополнительного ряда R80. Если при этом нельзя выбрать предпочтительные числа для всех параметров и размеров, то предпочтительные числа должны применяться для наиболее важных числовых характеристик, а величины характеристик, зависящих от основных, устанавливаются согласно правилам, указанным для производных рядов.

В отдельных технических обоснованных случаях допускается производить округление предпочтительных чисел, при этом следует пользоваться табл. 6-3.

Таблица 6-3

Предпочтительные числа	Округленные числа	Предпочтительные числа	Округленные числа
1,06	1,05	3,15	3,0; 3,2
1,12	1,1	3,35	3,4
1,18	1,15; 1,2	3,55	3,5; 3,6
1,25	1,2	3,75	3,8
1,32	1,3	4,25	4,2
1,6	1,5	4,75	4,8
2,12	2,1	5,6	5,5
2,24	2,2; 2,25	6,3	6,0
2,36	2,35; 2,4	6,7	6,5
2,65	2,6	7,1	7,0

В электротехнике (в частности, в электронной промышленности) иногда используют для рядов номинальных сопротивлений резисторов или номинальных емкостей электрических конденсаторов геометрические прогрессии и с другими знаменателями, например ряды E6, E12, E23 со знаменателями $\sqrt[6]{10}$; $\sqrt[12]{10}$; $\sqrt[24]{10}$. Ряды с такими знаменателями предусмотрены также в публикациях Международной электротехнической комиссии (МЭК), в которых установлены ряды значений сопротивлений резисторов и ряды значений емкостей конденсаторов, применяемых в электронной технике. Однако в бюллетене МЭК № 63 указывается, что такая градация себя не оправдала.

6-2. ГЛАВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И ПРИСОЕДИНЯЕМОГО К НИМ ОБОРУДОВАНИЯ

Общие положения

Главными параметрами, служащими принципиальной основой проектирования и конструирования электротехнических изделий всех видов и назначений электрических устройств, электроустановок, а также применяемыми при практическом осуществлении электрификации в СССР, являются номинальные напряжения, частоты и токи, устанавливаемые государственными стандартами. Стандарты, нормирующие главные параметры, имеют важное значение для всего народного хозяйства.

Стандартные напряжения, частоты и токи определены комплексом стандартов:

ГОСТ 23366-78 Ряды номинальных напряжений постоянного и переменного тока

ГОСТ 21128-75 Системы электроснабжения. Сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В и допускаемые отклонения

ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В

ГОСТ 6697-75. Системы электроснабжения, источники, преобразователи и приемники электрической энергии переменного тока. Номинальные частоты от 50 до 10 000 Гц и допускаемые отклонения

ГОСТ 6827-76 (СТ СЭВ 780-77) Электрооборудование и приемники электрической энергии. Ряд номинальных токов

Ряды номинальных постоянного и переменного напряжений

ГОСТ 23366-78 распространяется на изделия, имеющие выводы для электрического соединения (присоединения) с другими изделиями и устанавливает ряды номинальных напряжений на выводах этих изделий для постоянного и переменного тока с частотами по ГОСТ 6697-75. ГОСТ 23366-78 применяется при разработке стандартов и технических условий, в которых нормируются ряды или отдельные значения номинальных напряжений на изделия конкретных групп и видов. Этот ГОСТ базируется на рядах предпочтительных чисел R40 и R80 по ГОСТ 8032-56 с учетом допустимых округленных значений.

Основной ряд постоянного и переменного напряжения для изделий, предназначенных для использования электроэнергии: 0,6; 1,2; 2,4; 6; 9; 12; 27; 40; 60; 110; 220; 380; 660; 1140; 3000; 6000; 10 000; 20 000; 35 000; 110 000; 220 000; 330 000; 500 000; 750 000; 1 150 000 В.

Для источников и преобразователей электроэнергии:

Переменные напряжения, В 6; 12; 28,5; 42; 62; 115; 120; 208; 230; 400; 690; 1200; 3150; 6300; 10 500; 13 800; 15 750; 18 000; 20 000; 24 000; 27 000; 38 500; 121 000; 242 000; 347 000; 525 000; 787 000

Постоянные напряжения, В 6; 9; 12; 28,5; 48; 62; 115; 230; 460; 690; 1200; 3300; 6600

Номинальные напряжения до 1000 В. ГОСТ 21128-75 устанавливает номинальные значения и допускаемые отклонения переменных и постоянных напряжений систем электроснабжения, сетей, источников, преобразователей и присоединяемых к ним приемников электроэнергии. Стандарт не устанавливает значения и допускаемые отклонения напряжений: соответствующих аварийным режимам работы и переходным процессам; на изделиях, работа которых по принципу действия не характеризуется фиксированным значением напряжения; устройств для технологических процессов, осуществление которых не может быть обеспечено требованиями, указанными в стандарте электрических цепей, замкнутых внутри электрических машин, аппаратов, устройств измерения, контроля, сигнализации и управления, электрифицированного транспорта. Но и в перечисленных случаях, когда это возможно, должны использоваться стандартные напряжения.

В диапазоне до 1000 В для четырехпроводной сети переменного тока два числовых значения номинальных напряжений записываются с дробной чертой, например 380/220 В, что означает соответственно междуфазное (в числителе) и фазное (в знаменателе) напряжения.

В табл. 6-4 приведены номинальные напряжения систем электроснабжения (источников, преобразователей, сетей) и при-

Таблица 6-4

Постоянный ток		Переменный ток ¹			
Источники и преобразователи	Сети и приемники	Источники и преобразователи ²		Сети и приемники	
		Однофазный ток	Трехфазный ток	Однофазный ток	Трехфазный ток
28,5 115	27 110	42	42	40	40
230	220	230	230 400 690	220 380 660	220 380 660
460	440				

¹ Номинальные переменные напряжения установлены для частот по ГОСТ 6697-75 и являются также рекомендуемыми для нефиксированных частот и частот более 10 000 Гц.

² Для источников и преобразователей трехфазного тока указаны междуфазные значения напряжений.

соединяемых к ним приемников электрической энергии, установленные в ГОСТ 21128-75 в вольттах.

Стандартом дополнительно к указанным в таблице допускается применение отдельных значений номинальных напряжений с указанием области или условий их применений, согласованных в указанном порядке.

Номинальные напряжения свыше 1000 В. Для целей электроснабжения (обеспечения потребителей электрической энергией) в современных условиях используются почти исключительно системы трехфазного тока.

ГОСТ 721-77 устанавливает номинальные междофазные напряжения трехфазного тока свыше 1000 В электрических сетей, источников и приемников электрической энергии, общего назначения, а также их наибольшие междофазные рабочие напряжения, длительно допустимые по условиям работы изоляции электрооборудования для каждого класса напряжения.

Таблица 6-5

Классы напряжения электрооборудования;
действующее значение напряжения, кВ

Класс напряжения электрооборудования	Наибольшее рабочее напряжение электрооборудования	Номинальное напряжение электрической сети	Наибольшее длительно допускаемое рабочее напряжение в электрической сети
(3)	3,6	3,0 3,15 3,3	3,5 3,5 3,6
6	7,2	6,0 6,6	6,9 7,2
10	12,0	10,0 11,0	11,5 12,0
(15)	17,5	13,8 15,0 15,75	15,2 17,5 17,5
20	24,0	18,0 20,0 22,0	19,8 23,0 24,0
(24)	26,5	24,0	26,5
(27)	30,0	27,0	30,0
35	40,5	35	40,5
110	126,0	110,0	126,0
(150)	172,0	150,0	172,0
220	252,0	220,0	252,0
330	363,0	330,0	363,0
500	525,0	500,0	525,0
750	787,0	—	—
1150	1200,0	—	—

Примечания: 1. Классы напряжений 3 и 150 кВ допускаются только для существующих сетей.

2. Классы напряжений 15, 24 и 27 кВ допускаются для турбогенераторов мощностью 100 МВт и выше, гидрогенераторов 50 МВт и выше, синхронных компенсаторов 160 Мвар и выше.

В табл. 6-5 приведены только номинальные междофазные напряжения сетей и приемников по ГОСТ 1516.1-76, соответствующие ГОСТ 721-77.

В ГОСТ 721-77 впервые предусмотрена новая ступень номинального напряжения для сетей и приемников электроэнергетики 1150 кВ и соответственно 1200 кВ для наибольшего рабочего напряжения электрооборудования.

Номинальные напряжения, указанные в скобках, для вновь проектируемых сетей не рекомендуются. На эти напряжения электрооборудование изготавливается только для существующих и расширяющихся сетей.

Для электрооборудования, применяемого в угольной промышленности, кроме напряжений трехфазного переменного тока, указанных в таблице, применяются напряжения 1140 В для приемников и 1200 В для источников.

Номинальные частоты

Электроэнергия в СССР производится главным образом в виде переменного тока стандартной частоты 50 Гц. Часть производимой энергии этой частоты преобразуется для технологического использования и других целей в переменный ток повышенной (более 50 Гц) и частично пониженной (менее 50 Гц) частот. Мощность установок, работающих на частотах, отличающихся от 50 Гц, в пределах до 10 000 Гц достигает сотен мегаватт.

Широкое применение тока повышенной частоты для промышленных целей при отсутствии нормализованного ряда частот приводило к тому, что изготавливались установки на произвольные, случайно выбранные заказчиками частоты без достаточного учета всех технико-экономических факторов, определяющих рациональность выбранной частоты. Это приводило к тому, что в стране стали изготавливаться для промышленных целей установки на весьма близкие друг к другу частоты, например 400, 427, 450, 500 Гц. Рост числа частот переменного тока в свою очередь увеличил номенклатуру генераторов, приемников электроэнергии, регулирующих, измерительной аппаратуры и прочего электрооборудования. Это затрудняло изготовление и эксплуатацию установок промышленной частоты, особенно машинных генераторов, электродвигателей и преобразователей.

Из изложенного следует, что возник вопрос о стандартизации номинальных частот переменного тока, на которые должны изготавливаться установки переменного тока как генерирующие, так и приемные и в первую очередь частот в диапазоне до 10 000 Гц, в котором главным образом изготавливаются машинные генераторы и электродвигатели.

Номинальные значения частот, установленные ГОСТ 6697-75:

для источников энергии: 50, 400, 1000, 6000, 10 000 Гц;

для преобразователей и приемников электрической энергии: 50, 400, 1000, 2000, 4000, 6000, 10 000 Гц.

Дополнительно согласно стандарту допускается применение следующих частот:

для электроинструмента, электроприводов центрифуг, сепараторов и деревообрабатывающих станков: 100, 150, 200, 300 Гц;

для электротермического оборудования: 500, 2400, 8000 Гц;

для корабельных навигационных гироскопических устройств: 500 Гц.

Все указанные номинальные частоты кратны основной частоте тока, принятой в СССР и во всей Европе. Каждая из отдельно взятых частот ряда соответствует значениям предпочтительных чисел (точно или с учетом допускаемых округлений), установленных в ГОСТ 8032-56.

Преимущественное фактическое применение частот, предусмотренных ГОСТ 6697-75:

50 Гц — стандартная промышленная частота;

100, 150 Гц — электропривод деревообрабатывающих станков;

200 Гц — переносный электроинструмент, нужды полиграфической промышленности и ряд технологических процессов электронагрева;

300 Гц — электропривод в машиностроении;

400 и частично 500 Гц — для гироскопических приборов;

1000, 2000 и частично 2400 Гц — электропривод в машиностроении и в технологических процессах нагрева и плавки металлов;

остальные частоты ряда — преимущественно плавка металлов и сплавов.

В ГОСТ 6697-75 установлены допускаемые отклонения от номинальных значений частот систем электроснабжения, источников, преобразователей и приемников электроэнергии: 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5; 10%¹.

Допускаемые отклонения от номинальных значений частот могут быть: двусторонние симметричные ($\pm$); односторонние (+) или (—); несимметричные.

Указанные допускаемые отклонения не распространяются на электрические станции и сети общего назначения частоты 50 Гц, где качество энергии нормируется ГОСТ 13109-67.

Ряд номинальных токов

ГОСТ 6827-76 (СТ СЭВ 780-77) «Приборы и оборудование электрические. Номинальные токи» распространяется на элект-

рические приборы, оборудование и приемники электрической энергии, для которых основным параметром является номинальный ток, а также на части электротехнических устройств, которые по своей конструкции и назначению рассчитаны на другие номинальные токи, отличающиеся от номинальных токов электротехнических устройств, например контакты реле, вспомогательные контакты.

Стандарт устанавливает номинальные значения постоянного и переменного токов от 0,0001 до 250 000 А с частотой до 10 000 Гц в нормальных и установившихся режимах работы электрических приборов, оборудования и приемников электрической энергии. Стандарт не устанавливает номинальные токи для:

переходных процессов; электрооборудования технологических процессов, осуществление которых не может быть обеспечено требованиями настоящего стандарта;

цепей, замкнутых внутри электрических машин, аппаратов и подобных им изделий; цепей и устройств измерения, контроля, сигнализации и управления;

элементов тепловых реле;

катушек электрических аппаратов;

аппаратов и трансформаторов тока, предназначенных для измерения токов источников электрической энергии и преобразовательных агрегатов на номинальные токи свыше 10 000 А;

бортового электрооборудования постоянного и переменного тока летательных аппаратов и специальных транспортных машин.

В перечисленных случаях номинальные токи следует по возможности выбирать из приведенных в указанном стандарте.

Номинальные токи, А, должны соответствовать табл. 6-6.

Из перечисленных значений токов до 1000 А предпочтительными являются следующие: 1,00; 1,60; 2,50; 4,00; 6,30 А, а также десятичные кратные и дольные значения этих токов.

Номинальные токи со значениями 0,125; 0,315; 0,63; 3,15; 6,30; 12,5; 31,5 А можно округлять до следующих значений: 0,12; 0,30 или 0,32; 3,0 или 3,2; 6,00; 12,0; 32,0 А. Значения токов менее 0,1 А округляют аналогично.

Ряды основных параметров электрических машин

В стандартах на электрические машины кроме размеров, технических требований и методов испытаний устанавливаются основные параметры: номинальные напряжения в вольтах, частота вращения (синхронная) в оборотах в минуту и мощность в киловаттах или ваттах.

Одним из важнейших параметров, устанавливаемых стандартами на электрические машины, является мощность. Приводим в качестве примера ГОСТ 12139-74, в кото-

¹ В технически обоснованных случаях по согласованию с головной организацией по стандартизации и основным заказчиком.

Таблица 6-6

0,0001	0,0010	0,010	0,108	1,00	10,0	100	1000	10 000 (11 200)	100 000 (112 000)
	0,0012	0,012	0,125	1,25	12,5	125	1250	12 500 (14 000)	125 000 (140 000)
	0,0016	0,016	0,16	1,60	16,0	160	1600	16 000 (18 000)	160 000 (180 000)
0,0002	0,0020	0,020	0,20	2,00	20,0	200	2000	20 000 (22 500)	200 000 (225 000)
	0,0025	0,025	0,25	2,50	25,0	250	2500	25 000 (28 000)	250 000 (280 000)
0,0003	0,0030	0,030	0,315	3,15	31,5	315	3150	31 500 (35 500)	315 000 (350 000)
0,0004	0,0040	0,040	0,40	4,00	40,0	400	4000	40 000 (45 000)	400 000 (450 000)
0,0005	0,0050	0,050	0,50	5,00	50,0	500	5000	50 000 (56 000)	500 000 (560 000)
0,0006	0,0060	0,060	0,63	6,80	63,0	630	6300	63 000 (71 000)	630 000 (710 000)
0,0008	0,0080	0,080	0,80	8,00	80,0	800	8000	80 000	

Примечания: 1. Значения токов, указанные в скобках, в новых разработках применять не следует.

2. Для плавких предохранителей низкого напряжения допускается применять значение токов 35 А, которое заменяет 31,5 и 40 А.

3. Для трансформаторов тока допускается применять в дополнение к указанным значениям следующие значения токов: 15, 30, 60, 75, 120 А.

Таблица 6-7

0,000010	0,00010	0,0010	0,010	—	1,1	11	110	1009	10 000
—	—	—	—	0,12	—	15	132	1250	—
—	0,00016	0,0016	0,016	0,18	1,5	18,5	160	1600	—
—	—	—	—	—	2,2	22	259	2500	—
0,000025	0,00025	0,0025	0,025	0,25	—	—	250	2500	—
—	—	—	—	—	3,0	30	315	3150	—
—	0,00040	0,0040	0,040	0,37	4,0	37	400	4000	—
—	—	—	—	—	—	45	—	—	—
—	—	—	—	—	5,5	55	500	5000	—
0,000060	0,00060	0,0060	0,060	0,55	—	—	630	6300	—
—	—	—	—	0,75	7,5	75	800	8000	—
—	—	—	0,090	—	—	90	—	—	—

ром установлен ряд номинальных мощностей для всех видов вновь разрабатываемых электрических машин постоянного и переменного тока независимо от областей их применения, кВт (табл. 6-7).

Максимальное приближение ряда мощностей наиболее массовых асинхронных электродвигателей к ряду предпочтительных чисел R10 соответственно определяет также выбор этого же ряда для мощностей многих рабочих машин, механизмов и станков, работающих от электропривода.

Номинальные мощности силовых трансформаторов

Важнейшим параметром силовых трансформаторов и автотрансформаторов является номинальная мощность.

Ряд номинальных мощностей трехфазных силовых трансформаторов и автотранс-

форматоров мощностью от 0,01 кВ·А и выше установлен в ГОСТ 9680-77, в соответствии с ГОСТ 8032-56 «Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел». Номинальные мощности, устанавливаемые в стандартах всех категорий и ТУ на трехфазные и однофазные силовые трансформаторы и автотрансформаторы выбираются из ряда мощностей установленного в ГОСТ 9680-77. Этот стандарт не распространяется на трансформаторы для питания радиотехнических и электронных устройств, для бытовых электроприборов и измерительные трансформаторы, однако и для этих трансформаторов, когда это возможно, рекомендуется руководствоваться требованиями, установленными в указанном стандарте.

Ниже приводится ряд номинальных мощностей трехфазных трансформаторов из ГОСТ 9680-77:

0,010	0,100	1,00	10,0	100	1000	10 000	100 000	1 000 000
(0,012)	(0,125)	(1,25)	(12,5)	(125)	(1250)	(12 500)	125 000	1 250 000
0,016	0,160	1,60	16,0	160	1600	16 000	160 000	1 600 000
(0,020)	(0,200)	(2,00)	(20,0)	(200)	(2000)	(20 000)	200 000	2 000 000
0,025	0,250	2,50	25,0	250	2500	25 000	250 000	2 500 000
			320	3200	32 000			

(0,032)	(0,315)	(3,15)	(31,5)	(315)	(3150)	(31 500)	(315 000)	3 150 000
0,040	0,400	4,00	40,0	400	4000	40 000	400 000	4 000 000
(0,050)	(0,500)	(5,00)	(50,0)	(500)	(5000)	(50 000)	500 000	5 000 000
0,063	0,630	6,30	63,0	630	6300	63 000	630 000	6 300 100
(0,080)	(0,800)	(8,00)	(80,0)	(800)	(8000)	80 000	800 000	8 000 000

Номинальные мощности, указанные в скобках, применяются только для специальных трехфазных трансформаторов и трансформаторов, предназначенных для экспорта.

Номинальные мощности однофазных трансформаторов, предназначенных для работы в трехфазной группе, составляют одну треть номинальных мощностей, указанных в приведенном ряде мощностей. Для однофазных трансформаторов, не предназначенных для такого применения, значения номинальных мощностей принимаются такими же, как для трехфазных трансформаторов.

Ряды номинальных линейных размеров

Размеры электрических машин, определяющие возможность присоединения их к рабочим машинам (например, размеры выстой оси вращения и диаметров концов валов электрических машин), как правило, установлены в соответствии с ГОСТ 6636-69 «Нормальные линейные размеры». Этот стандарт устанавливает ряды линейных размеров в интервале от 0,01 до 20 000 мм, которые применяются в машиностроении. Ряды линейных размеров в ГОСТ 6636-69 соответствуют рекомендации СЭВ РС 431-71 «Нормальные линейные размеры».

ГОСТ 6636-69 не распространяется на технологические межоперационные размеры. В этом стандарте в отдельных случаях с учетом сложившейся практики конструирования взамен предпочтительных чисел приняты их округленные значения. Применение других округленных или не округленных значений не допускается.

В стандарте предусмотрено четыре ряда линейных размеров Ra5; Ra10; Ra20 и Ra40 (в ГОСТ 6636-69 обозначение ряда чисел с определенным округлением Ra — R с индексом «а» — принято в отличие от обозначения по ГОСТ 8032-56). При выборе размеров предпочтение отдается числам из рядов с более крупной градацией. Стандартом допускается из основных рядов составлять ряды, которые в различных диапазонах имеют неодинаковые знаменатели прогрессии. Это допущение часто используется при установлении размеров электрооборудования и его элементов. Стандартом допускается также применять производные ряды, получаемые путем отбора каждого 2-го, 3-го или n -го члена одного и того же ряда.

Установлен диапазон нормальных линейных размеров по ГОСТ 6636-69:

Для Ra5 в пределах от 0,010 до 16 000	
» Ra10 » » » 0,010 » 20 030	
» Ra20 » » » 0,010 » 20 000	
» Ra40 » » » 0,012 » 20 000	

Ряд линейных размеров Ra40 является самым частым.

Если из ряда Ra40, начиная с 0,012, взять числа с интервалом через один член и прибавить величины 0,010 и 0,011, то образуется ряд номинальных линейных размеров Ra20.

Если из ряда Ra20 взять числа через один член, то образуется Ra10.

Если из ряда Ra10 взять числа через один член, то образуется ряд Ra5.

Исходя из указанной закономерности, достаточно привести только нормальные линейные размеры Ra40, чтобы можно было воспроизвести все значения, установленные ГОСТ 6636-69 для Ra5; Ra10 и Ra20.

Значения самого частого ряда Ra40 (0,012...20 000) по ГОСТ 6636-69 приведены в табл. 6-8.

Таблица 6-8

	0,100	1,00	10	100	1000	10 000
	0,105	1,05	10,5	105	1006	10 600
	0,110	1,10	11	110	1120	11 200
	0,115	1,15	11,5	115	1180	11 800
0,012	0,120	1,2	12	120	1250	12 500
0,013	0,130	1,3	13	130	1320	13 200
0,014	0,140	1,4	14	140	1400	14 000
0,015	0,150	1,5	15	150	1500	15 000
0,016	0,160	1,6	16	160	1600	16 000
0,017	0,170	1,7	17	170	1700	17 000
0,018	0,180	1,8	18	180	1800	18 000
0,019	0,190	1,9	19	190	1900	19 000
0,020	0,200	2,0	20	200	2000	20 000
0,021	0,210	2,1	21	210	2120	21 200
0,022	0,220	2,2	22	220	2240	22 400
0,024	0,240	2,4	24	240	2360	23 600
0,025	0,250	2,5	25	250	2500	25 000
0,026	0,260	2,6	26	260	2650	26 500
0,028	0,280	2,8	28	280	2800	28 000
0,030	0,300	3,0	30	300	3000	30 000
0,032	0,320	3,2	32	320	3150	31 500
0,034	0,340	3,4	34	340	3350	33 500
0,036	0,360	3,6	36	360	3500	35 000
0,038	0,380	3,8	38	380	3750	37 500
0,040	0,400	4,0	40	400	4000	40 000
0,042	0,420	4,2	42	420	4250	42 500
0,045	0,450	4,5	45	450	4500	45 000
0,048	0,480	4,8	48	480	4750	47 500
0,050	0,500	5,0	50	500	5000	50 000
0,053	0,530	5,3	53	530	5300	53 000
0,056	0,560	5,6	56	560	5600	56 000
0,060	0,600	6,0	60	600	6000	60 000
0,063	0,630	6,3	63	630	6300	63 000
0,067	0,670	6,7	67	670	6700	67 000
0,071	0,710	7,1	71	710	7100	71 000
0,075	0,750	7,5	75	750	7500	75 000
0,080	0,800	8,0	80	800	8000	80 000
0,085	0,850	8,5	85	850	8500	85 000
0,090	0,900	9,0	90	900	9000	90 000
0,095	0,950	9,5	95	950	9500	95 000

6.3. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Безопасность электрооборудования

Среди причин травматизма в промышленности, в разных отраслях народного хозяйства значительная доля падает на электротравматизм. В связи с этим в общей системе стандартизации безопасности во второй ее классификационной группе предусмотрена подгруппа государственных стандартов ГОСТ 12.2.007.0-75 — ГОСТ 12.2.07.14-75 (15 стандартов) на электротехнические изделия.

Структура этой подгруппы предусматривает наличие стандарта — ГОСТ 12.2.007.0-75, распространяющегося на все электротехнические изделия (кроме выполненных в виде комплексов электроизделий — взрывозащищенных, морских и речных судов, — электровозов и бытовых приборов) и в дополнение к нему функционируют стандарты, устанавливающие требования безопасности к отдельным группам электротехнических изделий, как-то к электрическим машинам, трансформаторам, аппаратам и др. (ГОСТ 12.2.007.1-75 — 12.2.007.14-75). Ниже кратко приводим наиболее характерные требования из них (см. также § 8-2).

В ГОСТ 12.2.007.0-75 установлены требования безопасности, предотвращающие или уменьшающие до допустимого уровня воздействия на человека:

- электрического тока;
- электрической искры и дуги;
- движущихся частей изделия;
- частей изделия, нагревающихся до высоких температур;
- опасных и вредных материалов, используемых в конструкции изделия, а также опасных и вредных веществ, выделяющихся при его эксплуатации;
- шума и ультразвука;
- вибрации;
- электромагнитных полей, теплового, оптического и рентгеновского излучения.

Электротехнические изделия, используемые как производственное оборудование, должны, кроме того, соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.003-74.

В ГОСТ 12.2.007.0-75 учтены требования стандартов и рекомендаций Международных организаций (СЭВ, публикаций МЭК, СЕЕ, ИСО).

ГОСТ 12.2.007.0-75 устанавливает пять классов защиты: 0; 0I; I; II и III.

Ниже приведена характеристика каждого из названных классов.

К классу 0 относят изделия, имеющие рабочую изоляцию и не имеющие элементов для заземления.

К классу 0I относят изделия, имеющие изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания.

К классу I относят изделия, имеющие рабочую изоляцию и элемент для заземления. Если изделие класса I имеет провод для присоединения к источнику питания, этот провод должен иметь заземляющую жилу и вилку с заземляющим контактом.

К классу II относят изделия, имеющие двойную или усиленную изоляцию и не имеющие элементов для заземления.

К классу III относят изделия, не имеющие ни внутренних, ни внешних электрических цепей с напряжением свыше 42 В. Изделия, получающие питание от внешнего источника, могут быть отнесены к классу III только в том случае, если они предназначены для присоединения непосредственно к источнику питания с напряжением не выше 42 В, у которого при холостном ходе оно не превышает 50 В. При использовании в качестве источника питания его трансформатора или преобразователя его входная и выходная обмотки электрически не связаны и между ними должна быть двойная или усиленная изоляция.

Следует иметь в виду, что для отдельных групп стандартов на электротехнические изделия специального назначения, например, в ГОСТ 12.2.013-75 «Система стандартов безопасности труда. Машины ручные электрические. Общие требования безопасности» принята несколько другая классификация по способу защиты человека от поражения электрическим током, установлены три класса I, II и III и с несколькими другими характеристиками не только в стандартах СССР, но и в международной практике стандартизации. То же и для бытовых электроприборов.

Степени защиты электротехнических изделий, обеспечиваемые оболочками

К стандартам, общим для всех электротехнических изделий, относится так же СТ СЭВ 778-77 «Изделия электротехнические. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками. Обозначения. Методы испытаний». Этот стандарт распространяется на электротехнические изделия с номинальными напряжениями не более 72,5 кВ.

Для обозначения степени защиты применяются буквы IP и следующие за ними две цифры. Первая цифра обозначает степень защиты от соприкосновения с движущимися частями, расположенными внутри оболочки, а также степень защиты оболочки от попадания внутрь твердых посторонних тел. Вторая цифра обозначает степень защиты изделий от попадания воды.

Степени защиты, определенные первой цифрой обозначения, указывают:

0 — защита отсутствует;

I — защита от проникновения внутрь оболочки твердых тел размером более 50 мм, а также от проникновения большого участка поверхности человеческого тела;

2 — защита от проникновения твердых тел размером более 12 мм, а также пальцев или предметов длиной более 80 мм;

3 — защита от твердых тел — инструментов, проволок диаметром или толщиной более 2,5 мм;

4 — защита от проволок, твердых тел размером 1,0 мм;

5 — защита от пыли. При этом проникновение внутрь оболочки пыли полностью не предотвращается, однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия;

6 — пыленепроницаемость. Проникновение пыли предотвращено полностью.

Степени защиты, определенные второй цифровой обозначения, указываются:

0 — защита отсутствует;

1 — защита от капель воды, падающих вертикально на оболочку, они не должны оказывать вредного воздействия на изделие;

2 — защита от капель воды при наклоне до 15°. Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие при наклоне его оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения;

3 — защита от дождя. Вода в виде дождя, падающая на оболочку под углом до 60° от вертикали, не должна оказывать вредного воздействия на изделие;

4 — защита от брызг. Вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на изделие;

5 — защита от водяных струй. Струя воды, выбрасываемая в любом направлении на оболочку, не должна оказывать вредного воздействия на изделие;

6 — защита от волн воды. Вода при волнении не должна попадать внутрь оболочки в количестве, достаточном для повреждения изделия;

7 — защита при погружении в воду. Вода не должна проникать в оболочку, погруженную в воду при определенных условиях давления и времени в количестве, достаточном для повреждения изделия;

8 — защита при длительном погружении в воду. Изделия пригодны для длительного погружения в воду при условиях, установленных изготовителем.

Обозначения степени защиты наносятся на оболочку изделия или на табличку с паспортными данными.

Пример условного обозначения: оболочка электротехнического изделия, предохраняющая персонал от возможности соприкосновения пальцами с токоведущими или движущимися частями изделия и, кроме того, предохраняющая от попадания твердых тел диаметром более 12 мм и предохраняющая от дождя, падающего на оболочку под углом до 60° к вертикали обозначается IP23.

Если для изделия нет необходимости в одном из видов защиты, допускается в условном обозначении проставлять знак X

вместо обозначения того вида защиты, который не требуется или испытание которого не производится, например IPX2.

Под защитой от соприкосновения с движущимися частями подразумевается только защита от соприкосновения с такими движущимися частями внутри оболочки, которые могут причинить вред персоналу.

В СТ СЭВ 778-77 установлены методы испытания для проверки степеней защиты электротехнического изделия, находящегося в оболочке.

В дополнение к СТ СЭВ 778-77 имеются стандарты на изделия отдельных отраслей электротехнической промышленности.

Степени защиты электрических машин

Конкретные серии или типы электрических машин в зависимости от номинального режима и условий работы, для которых они предназначены, изготавливаются со степенями защиты по СТ СЭВ 247-76.

Стандарт СЭВ устанавливает степени защиты электрических машин номинальным напряжением до 1000 В.

Степени защиты электрических машин приведены в табл. 6-9.

Таблица 6-9

Степень защиты персонала от соприкосновения и попадания посторонних тел	Вторая цифра (защита от проникновения воды)							
	0	1	2	3	4	5	6	7 8
0	IP00	IP01	—	—	—	—	—	—
1	IP10	IP11	—	—	—	—	—	—
2	IP20	IP21	IP22	IP23	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	IP43	IP44	—	—	—
5	—	—	—	—	IP54	IP55	IP56	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—

Исходя из специфических особенностей отдельных видов электрических машин, допускаются степени защиты IP57 и IP58.

Степени защиты электрических аппаратов

Конкретные серии или типы аппаратов в зависимости от номинального режима и условий работы, для которых они предназначены, изготавливаются со степенями защиты по СТ СЭВ 592-77.

Стандарт СЭВ устанавливает степени защиты электрических аппаратов номинальным напряжением до 1000 В (табл. 6-10).

Таблица 6-10

Первая цифра (защита от прикоснове- ния и посто- ронних тел)	Вторая цифра (защита от проникновения воды)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	—	—	—	—	—	—	—	—
1	IP10	IP11	IP12	—	—	—	—	—	—
2	IP20	IP21	IP22	IP23	—	—	—	—	—
3	IP30	IP31	IP32	IP33	IP34	—	—	—	—
4	IP40	IP41	IP42	IP43	IP44	—	—	—	—
5	IP50	—	—	—	IP55	IP56	—	—	—
6	IP60	—	—	—	—	IP65	IP66	IP67	IP68

В стандарте примечанием указано, что по соглашению между изготовителем и заказчиком допускается применять другие степени защиты.

Общие положения о воздействии механических и климатических факторов внешней среды на электротехнические изделия в условиях эксплуатации

Нормы и требования к изделиям в части воздействия на них климатических и механических факторов внешней среды устанавливались до 1969 г. разрозненно — в технических заданиях (ТЗ) на разработку или модернизацию изделий, а также в стандартах и технических условиях на отдельные изделия. В результате изделия, работающие практически в одних и тех же условиях внешней среды, не были унифицированы по показателям, характеризующим условия эксплуатации. Некоторая унификация достигалась только в пределах отдельных подотраслей электротехники тем, что в стандартах, устанавливающих общие технические требования к отдельным группам изделий, начиная еще с 1941 г., например — к электрическим машинам (ГОСТ 183-41), силовым трансформаторам, или отдельным группам электрических аппаратов на напряжения до 1000 В, нормировались условия окружающей среды (в ограниченном объеме), для которых указанные электротехнические изделия предназначались.

В 1969—1972 гг. был утвержден ряд основополагающих стандартов, устанавливающих исполнения и категории изделий в части климатических и механических факторов внешней среды, воздействующих на изделия, в зависимости от их размещения в различных климатических районах.

В отношении климатических воздействий обобщения начались с того, что был утвержден основополагающий стандарт — ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды», а

также базирующиеся на нем стандарты, определяющие требования к специальным климатическим исполнениям.

ГОСТ 15151-69 «Машины, приборы и другие технические изделия для районов с тропическим климатом. Общие технические условия».

ГОСТ 14882-69 «Машины, приборы и другие технические изделия, предназначенные для эксплуатации в районах с холодным климатом. Общие технические требования».

Для развития и конкретизации требований этих стандартов с учетом специфики электротехнических изделий были разработаны следующие стандарты:

ГОСТ 15543-70 «Изделия электротехнические. Исполнения для различных климатических районов. Условия эксплуатации в части воздействия климатических факторов внешней среды»;

ГОСТ 15963-70 «Изделия электротехнические для районов с тропическим климатом. Общие технические условия»;

ГОСТ 17412-72 «Изделия электротехнические для районов с холодным климатом. Общие технические условия».

В отношении механических воздействий обобщение производилось одновременно для двух отраслей — электротехники и электронной техники. Был утвержден стандарт ГОСТ 16962-71 «Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний».

Так как этот стандарт содержал только ряд значений отдельных факторов, а требовалась также привязка этих значений к условиям эксплуатации, был утвержден еще один стандарт — ГОСТ 17516-72 «Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды».

Указанные стандарты полностью определяют требования к электротехническим изделиям в части воздействия внешних климатических и механических факторов, относящихся ко всем электротехническим изделиям.

Приведенные стандарты применяются при проектировании и изготовлении изделий — при составлении технических заданий (ТЗ) на разработку или модернизацию

изделий, а также при разработке стандартов и технических условий, устанавливающих требования и программы испытаний (ПИ) в части воздействия механических и климатических факторов внешней среды для групп изделий, а при отсутствии групповых документов — для отдельных видов и типов изделий.

В этих стандартах установлены группы исполнений изделий, к которым предъявляются требования выдерживать то или иное сочетание климатических факторов, в обобщенной форме отражающих условия эксплуатации.

В стандартах указано, что изделия должны сохранять свои параметры в пределах нормы, установленных соответствующей нормативно-технической документацией в течение обусловленных сроков службы и сроков сохраняемости после и (или) в процессе воздействия механических и климатических факторов, виды и значения которых соответствуют нормативно-технической документации, разработанной на основе названных стандартов.

Технические требования по климатическим воздействиям

ГОСТ 15150-69 распространяется на все виды машин, приборов и других технических изделий. Этот стандарт соответствует СТ СЭВ 458-77 и СТ СЭВ 460-77, а также ГОСТ 16350-70 «Климат. Районирование и характеристики климатических параметров для промышленных изделий».

В ГОСТ 15150-69 установлены климатические факторы. Под термином климатические факторы внешней среды понимаются: температура, влажность воздуха, давление воздуха или газа (высота над уровнем моря), солнечное излучение, дождь, ветер, пыль (в том числе снежная), смены температур, соляной туман, иней, гидростатическое давление воды, действие плесневых грибов, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов. Различают нормальные и номинальные значения климатических факторов.

Нормальные значения климатических факторов внешней среды — уточненные для использования в технике, естественно изменяющиеся значения климатических факторов в пределах данной географической зоны с учетом места размещения изделия.

Номинальные значения климатических факторов внешней среды — нормируемые в технических заданиях, стандартах или технических условиях значения климатических факторов (естественно изменяющиеся или неизменные), в пределах которых обеспечивается нормальная эксплуатация конкретных видов изделий, т. е. фактические требования к изделиям. В стандартах вида технических требований, общих технических условий, в технических заданиях устанавливаются требования по номинальным значениям климатических факторов.

Таблица 6-11

Исполнения изделий	Обозначения ¹		
	буквенные		цифровые
	русские	латинские	
<i>Изделия, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах</i>			
Для макроклиматического района с умеренным климатом ²	У	(N)	0
Для макроклиматических районов с умеренным и холодным климатом ²	УХЛ ⁴	(NF)	1
Для макроклиматического района с влажным тропическим климатом ³	ТВ	(TH)	2
Для макроклиматического района с сухим тропическим климатом ³	ТС	(TA)	3
Для макроклиматических районов как с сухим, так и с влажным тропическим климатом ³	Т	(T)	4
Для всех макроклиматических районов на суше, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом (общеклиматическое исполнение)	О	(U)	5

Изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом

Для макроклиматического района с умеренно холодным морским климатом	М	(M)	6
Для макроклиматического района с тропическим морским климатом, в том числе для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в этом районе	ТМ	(MT)	7
Для макроклиматического района как с умеренно холодным, так и тропическим морским климатом, в том числе для судов неограниченного района плавания	ОМ	(MU)	8
Изделия, предназначенные для эксплуатации во всех макроклиматических районах на суше и на море, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом (всеклиматическое исполнение)	В	(W)	9

¹ В скобках приведены обозначения, принятые в некоторых странах СЭВ. Цифровые обозначения применяются только для обработки данных на электрических вычислительных машинах и не применяются для маркировки.

² Изделия в исполнениях У и УХЛ могут эксплуатироваться в теплой и влажной зонах СССР, в которых средняя из ежегодных абсолютных максимумов температура воздуха выше 40°С и (или) сочетание температуры, равной или выше 20°С, и относительной влажности, равной или выше 80%, наблюдается более 12 ч в сутки за непрерывный период более двух месяцев в году.

³ Указанные исполнения могут быть обозначены термином «тропическое исполнение».

⁴ Если основным назначением изделий является эксплуатация в районах с холодным климатом и экономически нецелесообразно их использование вне пределов этого района, вместо обозначения УХЛ рекомендуется обозначение ХЛ.

Таблица 6-12

Укрупненные категории		Дополнительные категории	
Характеристика	Обозначение	Характеристика	Обозначение (по де- сятийной системе)
Для эксплуатации на открытом воздухе	1	Изделия для хранения в процессе эксплуатации в помещениях категории 4 и работы как в условиях категории 4, так и (кратковременно) в других условиях, в том числе на открытом воздухе	1.1
Для эксплуатации под навесом или в помещениях (объемах), где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебания на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, например в палатках, кузовах, прицепах, металлических помещениях без теплоизоляции, а также в кожухе комплектного изделия категории 1 (отсутствие прямого воздействия солнечного излучения и атмосферных осадков на изделие)	2	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категорий 1; 1.1 и 2, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах (например, внутри радиоэлектронной аппаратуры)	2.1
Для эксплуатации в закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, например в металлических с теплоизоляцией, каменных, бетонных, деревянных помещениях (отсутствие воздействия атмосферных осадков, прямого солнечного излучения, существенное уменьшение ветра, существенное уменьшение или отсутствие воздействия рассеянного солнечного излучения и конденсации влаги)	3	Для эксплуатации в нерегулярно отапливаемых помещениях (объемах)	3.1
Для эксплуатации в помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями, например в закрытых отапливаемых или охлаждаемых и вентилируемых производственных и других, в том числе хорошо вентилируемых подземных помещениях (отсутствие воздействия прямого солнечного излучения, атмосферных осадков, ветра, песка и пыли наружного воздуха; отсутствие воздействия рассеянного солнечного излучения и конденсации влаги)	4	Для эксплуатации в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом	4.1
Для эксплуатации в помещениях (объемах) с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях, в том числе шахтах, подвалах, в почве, в таких судовых, корабельных и других помещениях, в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке, в частности, в некоторых трюмах, в некоторых цехах текстильных, гидрометаллургических производств и т. п.)	5	Для эксплуатации в помещениях лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа	4.2
		Для эксплуатации в качестве встроенных внутри комплексных изделий категории 5 элементов, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах	5.1

В пределах нормальных и номинальных значений различают также рабочие и предельные рабочие значения.

Рабочие значения климатических факторов внешней среды — естественно изменяющиеся или неизменные значения климатических факторов, в пределах которых обеспечивается сохранение требуемых номинальных параметров и экономически целесообразных сроков службы изделий.

Предельные рабочие значения климатических факторов внешней среды при эксплуатации — значения климатических факторов, в пределах которых изделия могут (чрезвычайно редко и в течение не более 6 ч в году) оказаться при эксплуатации и

должны при этом:

а) сохранять работоспособность, но могут не сохранять требуемой точности и номинальных параметров (при этом в стандарте или технических условиях на изделия указываются допустимые отклонения по точности и номинальным параметрам, если эти отклонения имеют место);

б) после прекращения действия этих предельных рабочих значений восстанавливать требуемую точность и номинальные параметры. Требования к предельным рабочим значениям целесообразно предъявлять только к изделиям с высокой вероятностью безотказной работы.

В соответствии с ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 16350-70 поверхность земного шара

разделена на ряд макроклиматических¹ районов, разграниченных с точки зрения воздействия климатических факторов на технические изделия.

Технические изделия предназначают для эксплуатации в одном или нескольких микроклиматических районах и изготовляют в климатических исполнениях, указанных в табл. 6-11. Эти изделия в зависимости от места размещения при эксплуатации в воздушной среде на высотах до 4300 м (в том числе под землей и под водой) изготавливают по категориям размещения изделий (в дальнейшем категориям изделий, указанным в табл. 6-12).

Для изделий, предназначенных для эксплуатации только в неводушной среде и (или) при атмосферном давлении менее 53,3 кПа (400 мм рт. ст.), в том числе на высотах более 4300 м, понятие категорий изделий не применяют для всех стадий эксплуатации. Если одно и то же изделие предназначено для эксплуатации как в воздушной среде на высотах до 4300 м, так и в неводушной среде и (или) при атмосферном давлении менее 53,3 кПа (400 мм рт. ст.), в том числе на высотах более 4300 м, понятие категорий изделий применяют только для стадии эксплуатации в воздушной среде на высотах до 4300 м.

Летательные аппараты, а также изделия, предназначенные для эксплуатации на высоте более 1000 м над уровнем моря при пониженном атмосферном давлении, изготавливают по группам в зависимости от пониженного атмосферного давления, указанного в табл. 6-13. Сочетание исполнения, категории и группы по пониженному давлению называют «вид климатического исполнения» (например, «вид климатического исполнения УХЛ2а»)

В условном обозначении типа изделия дополнительно, после всех обозначений, относящихся к модификации изделия, вводят буквы и цифры, обозначающие вид климатического исполнения, например, электродвигатель закрытого обдуваемого исполнения со станиной и щитами из чугуна (АО2) второго габарита, 1-й длины (21), четырехполюсного, т. е. 1500 об/мин (4), в тропическом исполнении (Т), категории размещения (2) для работы на высоте до 2400 м (группа «а») обозначают АО2-21-4Т2а.

Обозначения климатического исполнения и категории указывают в сопроводительном документе и на табличке.

Для изделий, пригодных для эксплуатации одновременно в условиях, нормированных для нескольких климатических исполнений или категорий размещения, до-

Таблица 6-13

Обозначение групп пониженного давления	Атмосферное давление, кПа		Высота над уровнем моря, тыс. км
	Нижнее значение (по ГОСТ 15150-69)	Среднее значение (по ГОСТ 4401-73)	
а	70,0	75,6	2,4
б	60,0	66,8	3,5
в	53,3	59,3	4,3
г	26,7	29,0	9,4
д	12,0	13,3	14,4
е	4,4	5,5	20,0
ж	2,0	2,2	26,0
з	0,6	0,6	34,0
н	1,3·10 ⁻¹	1,3·10 ⁻¹	45,8
к	1,3·10 ⁻²	1,3·10 ⁻²	63,6
л	1,3·10 ⁻⁴	1,3·10 ⁻⁴	91,7
м	1,3·10 ⁻⁷	1,3·10 ⁻⁷	200
о	1,3·10 ⁻¹⁰	1,3·10 ⁻¹⁰	Средний и дальний космос
п	1,3·10 ⁻¹³	1,3·10 ⁻¹³	
	1,3·10 ⁻¹⁴	1,3·10 ⁻¹⁴	

пускается устанавливать обозначения одного из исполнений, обеспечивающего наиболее жесткие требования, или комбинированные обозначения.

Большинство электротехнических изделий, не предназначенных для летательных аппаратов, изготовляются для работы на нормальной высоте 1000 м над уровнем моря, до которой изделия предназначены работать с номинальными параметрами. Однако изделия могут работать на высотах, превышающих нормальную, но в этом случае в стандартах или в технических условиях на такие изделия указывают уменьшение номинальной нагрузки или предельно допустимых превышений температуры на каждые 100 или 1000 м высоты, превышающей нормальную.

В ГОСТ 15150-69 установлены коэффициенты, указывающие относительную электрическую прочность воздушных промежутков для высот от 1000 до 30 000 м (табл. 6-14).

В ГОСТ 15150-69 установлены четыре типа атмосферы на открытом воздухе, различающихся содержанием в них основных коррозионно-активных агентов согласно табл. 6-15.

Электротехнические изделия климатических исполнений У, УХЛ, Т, ТС предназначаются для эксплуатации в атмосфере типов I и II;— электротехнические изделия исполнений М, ОМ— в атмосфере типа III;— исполнение О— в атмосфере типа IV;— исполнение В— в атмосфере типов III и IV. В этих случаях в нормативно-технической документации на изделия не делают никаких указаний об атмосфере. Если же изделия предназначаются для экс-

¹ Макроклимат — климат крупных географических зон или больших их частей, рассматриваемых в основных своих чертах, например по однородности географических факторов, по значению определенных факторов, характеризующих количественными показателями по всей рассматриваемой территории. Макроклимату противопоставляется местный климат (в том числе климат менее крупных районов и зон) и микроклимат.

Таблица 6-14

Высота над уровнем моря, км	Коэффициент относительной электрической прочности воздушных промежутков	Высота над уровнем моря, км	Коэффициент относительной электрической прочности воздушных промежутков
1	1,00	9,00	0,39
1,2	0,98	10,00	0,35
1,5	0,95	12,0	0,30
1,8	0,92	14,0	0,25
2,0	0,90	15,0	0,22
2,5	0,85	16,0	0,19
3,0	0,80	18,0	0,14
3,5	0,75	20,0	0,10
4,0	0,72	22,0	0,08
4,5	0,67	24,0	0,07
5,0	0,62	25,0	0,06
6,0	0,56	26,0	0,05
7,0	0,51	28,0	0,04
8,0	0,45	30,0	0,03

Таблица 6-15

Тип атмосферы		Содержание коррозионно-активных агентов
Обозначение	Наименование	
I	Условно-чистая	Сернистый газ не более 20 мг/(м ² ·сут), не более 0,025 мг/м ³ ; хлориды — менее 0,3 мг/(м ² ·сут).
II	Промышленная	Сернистый газ от 20 до 110 мг/(м ² ·сут), от 0,025 до 0,13 мг/м ³ ; хлориды менее 0,3 мг/(м ² ·сут).
III	Морская	Сернистый газ не более 20 мг/(м ² ·сут), не более 0,025 мг/м ³ ; хлориды — от 30 до 300 мг/(м ² ·сут)
IV	Приморско-промышленная	Сернистый газ от 20 до 110 мг/(м ² ·сут), от 0,025 до 0,13 мг/м ³ ; хлориды — от 0,3 до 30 мг/(м ² ·сут)

платации только в атмосфере типа I, то должны быть сделаны специальные указания в нормативно-технической документации (НТД).

Очень важное значение имеет установленная в ГОСТ 15150-69 классификация групп условий эксплуатации по коррозионной активности атмосферы для металлов, сплавов, а также металлических и неметаллических неорганических покрытий (табл. 6-16).

Следует отметить, что в стандарте не учтены случаи воздействия на изделия смен температуры, а также случаи, когда в изделиях имеются материалы, выделяющие коррозионно-активные вещества. Эти случаи при необходимости оговариваются в стандартах или другой нормативно-технической документации на изделия.

В стандарте также указано, как должен производиться выбор групп условий эксплуатации металлов и покрытий в зависимости от климатического исполнения и категорий размещения изделий.

В ГОСТ 15150-69 установлены также условия хранения и транспортирования изделий в части воздействия климатических

Таблица 6-16

Группы условий эксплуатации			Исполнения	Категории изделий
Названия	Обозначения			
	основные	дополнительные		
Легкая	Л	—	Все исполнения УХЛ, У, ТС	4.1 2.1; 3*; 4 (кроме 4.1)
Средняя	С	С1	ТВ, Т, М, ТМ, ОМ, О, В ТС ТВ, Т, О, В ТС Т, ТВ, О	4 (кроме 4.1) 2; 3 3* 1* (кроме 1.1) 2,1; 3,1
		С2	ТС	1
		С3	У, УХЛ	2; 3; 1***; 1* (кроме 1.1)
		С4	Все исполнения, кроме ТС	1,1
Жесткая	Ж	Ж1	ТВ, Т, О	2; 3; 1***; 1* (кроме 1.1)
		Ж2	У, ХЛ	1 (кроме 1.1)
		Ж3	М, ТМ, ОМ, В	2***, 1***
Особо жесткая.	ОЖ	ОЖ1	Все исполнения	5
		ОЖ2	Все исполнения	3.1
		ОЖ3	ТВ, Т, О М, ТМ, ОМ	1 (кроме 1.1); 1 (кроме 1.1); 2

* Только для внутренних деталей, размещенных в оболочках изделий с естественной или искусственной вентиляцией.
** Только для изделий, специально предназначенных для эксплуатации в среде с условно-чистой атмосферой.
*** Только для деталей, защищенных от попадания брызг морской воды.

факторов внешней среды (здесь не приводятся).

ГОСТ 15543-70 «Изделия электротехнические. Исполнения для различных климатических районов. Условия эксплуатации в части воздействия климатических факторов внешней среды» ограничивает и конкретизирует требования ГОСТ 15150-69 применительно к специфике электротехнических изделий. Так, этим стандартом ограничивается (по сравнению с ГОСТ 15150-69) количество климатических исполнений и кате-

горий, в которых изготавливаются электротехнические изделия. Эти изделия не изготовляют исполнений ТВ, ТМ, исполнение ТС резко ограничено. Изделия, как правило, изготовляют только категорий 1, 2, 3, 4, 5, а некоторые изделия — категорий 2.1 и 5.1.

В зависимости от категорий, исполнений и конструктивных особенностей изделий установлены эффективное и верхнее рабочее значения температуры окружающего воздуха, для которых изделия предназначены (здесь не приводятся).

Под эффективным значением климатического фактора в соответствии с ГОСТ 15150-69 понимают условное постоянное значение фактора, принимаемое при расчетных номинальных параметрах изделий, влияющих на срок службы и (или) сохранности, существенно зависящих от данного фактора и нормированных для длительной работы изделий. Воздействие эффективного значения, как правило, эквивалентно воздействию переменного значения данного фактора в процессе эксплуатации и (или) хранения.

В ГОСТ 15543-70 приведены также типовые формулировки записи требований по воздействию климатических факторов в стандартах и другой нормативно-технической документации. Требования по климатическим воздействиям записывают в стандартах и технических условиях на изделия в виде ссылок на ГОСТ 15543-70 и ГОСТ 15150-69.

Технические требования по механическим воздействиям

ГОСТ 16962-71 «Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний» устанавливает следующие виды механических факторов, воздействующих на изделие в целом в эксплуатации: вибрационные нагрузки, ударные нагрузки (многократные и одиночные), линейные нагрузки, воздействия акустического шума. Установленные в стандарте характеристики отражают в обобщенной форме фактические воздействия на изделия в условиях эксплуатации. Установлены также некоторые специфические воздействия, действующие на выводные концы изделий: растягивающей силы, изгибающей силы, крутящего момента, скручивания. Эти характеристики в обобщенной форме отражают условия, которые имеют место при монтаже изделий у потребителя.

К изделиям, предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования по прочности и устойчивости при воздействии этих нагрузок. К изделиям, не предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования только по прочности при воздействии этих нагрузок.

Под прочностью к воздействию механических факторов понимают способность изделий выполнять свои функции и сохранять

свои параметры в пределах норм, установленных в стандартах (или технических условиях), после воздействия механических факторов.

Под стойкостью к воздействию механических факторов понимают способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в стандартах (или в технических условиях), во время воздействия механических факторов.

Виды механических факторов и значения их характеристик (степени жесткости) приведены в табл. 6-17. В указанных в табл. 6-17 диапазонах частот амплитуда вибрации не превышает 10 мм.

Таблица 6-17

Воздействующие факторы	Значения характеристик			Степень жесткости
	Диапазон частот, Гц	Максимальное ускорение, м/с ²	Длительность удара, мс	
Вибрационные нагрузки	1—35	5	—	I
	1—60	10	2	II
	1—60	20	—	III
	1—80	50	—	IV
	1—100	10	—	V
	1—200	50	—	VI
	1—200	100	—	VII
	1—600	50	—	VIII
	1—600	100	—	IX
	1—1000	100	—	X
	1—2000	50	—	XI
	1—2000	100	—	XII
	1—2000	150	—	XIII
	1—2000	200	—	XIV
	1—3000	200	—	XV
	1—5000	100	—	XVI
	1—5000	200	—	XVII
	1—5000	300	—	XVIII
	1—5000	400	—	XIX
	100—5000	400	—	XX
Ударные нагрузки:	многократные	—	—	—
		150	2—15	I
		400	2—10	II
		750	2—6	III
		1500	1—3	IV
	одиночные	—	40—60	I
		200	20—60	II
		750	2—6	III
		1500	1—3	IV
		5000	1—2	V
		10 000	0,2—1	VI
		15 000	0,2—0,5	VII
		30 000	0,2—0,5	VIII
Линейные (центробежные) нагрузки	—	100	—	I
	—	250	—	II
	—	500	—	III
	—	1000	—	IV
	—	1500	—	V
	—	2000	—	VI
	—	5000	—	VII

Степени жесткости XVI—XX по вибрационным нагрузкам устанавливают для изделий миниатюрных и сверхминиатюрных конструкций (например, для микроземелтов, интегральных микросхем, полупровод-

никовых приборов). Степень жесткости XX по вибрационным нагрузкам устанавливают в технически обоснованных случаях в качестве дополнительного требования к другим степеням жесткости.

Для изделий, предназначенных для работы в условиях воздействия акустического шума, значения характеристик акустического шума (степени жесткости) приведены в табл. 6-18.

Таблица 6-18.

Значения характеристик		Степени жесткости
Диапазон частот, Гц	Максимальный уровень звукового давления, дБ	
50—10 000	130	I
	140	II
	150	III
	160	IV
	170	V

Примечание. Нулевой уровень звукового давления соответствует $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Установленные в ГОСТ 16962-71 степени жесткости представляют собой порядковые номера в ряду значений каждого фактора и введены только для удобства ссылки в этом же стандарте при описании режимов испытаний. Эти степени жесткости не применяются для ссылки на них в стандартах на электротехнические изделия. В последних ссылки в части воздействия механических факторов внешней среды даются на группы условий эксплуатации по ГОСТ 17516-72, утвержденному в развитие и конкретизацию ГОСТ 16962-71 применительно к электротехническим изделиям. В ГОСТ 17516-72 установлено 30 групп условий эксплуатации (M1—M30) в зависимости от места размещения изделий при эксплуатации и вида объектов: в стационарных установках, на металлорежущих станках, прессах, молотах, вибромолотах, передвижных установках, тележках магистральных и промышленных электропоездов и в сочетании с многими другими видами рабочих машин и механизмов.

Для каждой группы условий эксплуатации установлены вибрационные нагрузки (диапазон частот, максимальное ускорение и степени жесткости по ГОСТ 16962-71), многократные удары (ускорение, длительность удара и степени жесткости по ГОСТ 16962-71), а также одиночные удары.

Таким образом, все многообразие условий эксплуатации электротехнических изделий сведено к сравнительно небольшому количеству классификационных групп.

В соответствии с экономической и технической целесообразностью рекомендуется изготавливать изделия, пригодные для нескольких групп условий эксплуатации, нормированных в ГОСТ 17516-72.

Изделия, удовлетворяющие требованиям какой-либо из групп, допускается применять в местах, указанных для других

групп, если изделия удовлетворяют требованиям, нормированным для этих групп.

Электротехнические изделия для районов с тропическим и холодным климатом

Для районов с тропическим климатом электротехнические изделия изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 15963-70 «Изделия электротехнические для районов с тропическим климатом. Общие технические условия».

ГОСТ 15963-70 распространяется на электротехнические изделия, предназначенные для эксплуатации в районах с сухим и влажным тропическим климатом (исполнение Т), а также для установки на морских судах или других устройствах, предназначенных для эксплуатации в районах как с тропическим, так и с умеренно холодным климатом (исполнение ОМ). В технически обоснованных случаях допускается изготовление исполнений ТС.

В соответствии с ГОСТ 15963-70 изделия типа Т и ТС рассчитывают для длительной работы при напряжении от $0,95 U_n$ до $1,05 U_n$; они должны сохранять свою работоспособность при кратковременном изменении напряжения сети в пределах $0,85 U_n$ до $1,1 U_n$ при переменном токе и от $0,8 U_n$ до $1,1 U_n$ при постоянном токе.

Длительность указанного изменения напряжения оговаривают в стандартах на отдельные типы электротехнических изделий тропического исполнения.

В стандарте установлены предельные допускаемые превышения температуры для изделий тропического исполнения и их частей в зависимости от эффективной температуры окружающего воздуха и класса нагревостойкости электрической изоляции, которые намного ниже установленных для электротехнических изделий тропического исполнения.

Электротехнические изделия, предназначенные для эксплуатации в районах с холодным климатом (исполнение УХЛ по ГОСТ 15150-69), изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ 17412-72 «Изделия электротехнические для районов с холодным климатом. Общие технические условия».

В обоих стандартах установлены требования по конструктивному выполнению изделий, связанному со специфическими воздействиями соответственно тропического и холодного климата.

К стандартам приложен перечень основных материалов, применяемых для изготовления оборудования в указанных климатических исполнениях (конструкционные металлы и сплавы, электротехнические, магнитные и электроизоляционные материалы, покровные и клеящие лаки и эмали, пластмассы, кабели и провода и т. д.). Установлены также правила приемки и методы испытаний изделий в части специфических воздействий факторов климата.

Таблица 6-19

При конструировании изделий для районов с тропическим или холодным климатом в первую очередь определяют возможность обеспечения их работоспособности модернизацией существующих конструкций или защитой от воздействия климатических факторов на месте установки. При невозможности обеспечить работоспособность изделий таким путем разрабатывают новую конструкцию с учетом требований, установленных в этих стандартах к конструкциям таких изделий и их элементов (к подшипниковым щитам, обмоткам, коллектору и др.), а также к применяемым материалам.

Испытания электротехнических изделий на стойкость к воздействию климатических и механических факторов внешней среды

Специфика правил приемки изделий, обусловленная испытаниями на воздействие климатических и механических факторов, а также методов испытаний, включающие испытательные режимы, приведены в ГОСТ 16962-71.

Уточнение и конкретизация некоторых режимов климатических испытаний приведены дополнительно в ГОСТ 15963-70 и 17412-72, а механических испытаний — в приложении к ГОСТ 17516-72. Перечень механических и климатических испытаний, установленных в ГОСТ 16962-71, приведен в табл. 6-19.

Виды механических испытаний в ГОСТ 16962-71 обозначены номерами с 101 по 113, а климатических испытаний — с 201 по 220. Включенные в стандарт виды испытаний пронумерованы в порядке их изложения. Если будут разработаны новые виды испытаний, они будут обозначены в порядке их включения (продолжения).

Для каждого вида испытаний в стандарте может быть предусмотрено несколько методов. Методы проведения каждого вида испытаний обозначаются номером, соответствующим номеру данного вида испытаний, с добавлением через дефис порядковых номеров испытаний. Если в стандарте для данного вида испытаний предусмотрен только один метод, он обозначается порядковым номером один. В стандарте для ряда видов испытаний предусмотрены ускоренные методы, а для ряда видов — нормальные испытания. Нумерацией видов и методов испытаний следует пользоваться при ссылках на ГОСТ 16962-71 в стандартах на изделия.

Например, для испытания на воздействие циклической смены температур (испытание 205, табл. 6-19) в стандарте предусмотрено пять методов, в том числе метод 4, применяемый для греющихся электротехнических изделий. В технических условиях и стандартах на такие изделия записывают, что «испытание на смену температур проводят методом 205-4 по ГОСТ 16962-71».

Испытание на воздействие одиночных ударов изделий электротехники, предназна-

Вид испытаний	Номера видов испытаний по ГОСТ 16962-71
<i>Механические испытания</i>	
Обнаружение резонансных частот	101
На виброустойчивость	102
На вибропрочность (длительное)	103
На вибропрочность (кратковременное)	103
На ударную прочность	104
На ударную стойкость	105
На воздействие одиночных ударов	106
На воздействие линейных (центробежных) нагрузок	107
На воздействие акустических шумов	108
Испытание выводов (выходных концов) на воздействие растягивающей силы	109
Испытание гибких проволочных и ленточных выводов на изгиб	110
Испытание гибких лепестковых выводов на изгиб	111
Испытание гибких проволочных выводов на скручивание	112
Испытание резбовых выводов на воздействие крутящего момента	113
<i>Климатические испытания</i>	
На теплостойкость при эксплуатации	201
На теплостойкость при температуре транспортирования и хранения	202
На холодостойкость при эксплуатации	203
На холодостойкость при температуре транспортирования и хранения	204
На воздействие смены температур	205
На воздействие инее с последующим его оттаиванием	206
На влажностойкость, длительное или ускоренное	207
На влажностойкость, кратковременное	208
На воздействие пониженного атмосферного давления	209
На воздействие повышенного давления воздуха или другого газа	210
На воздействие солнечной радиации	211
На динамическое воздействие пыли	212
На статическое воздействие пыли	213
Испытание на грибоустойчивость	214
На воздействие соляного тумана	215
На воздействие повышенного гидростатического давления	216
На водонепроницаемость	217
На брызгозащищенность	218
На канализационность	219
На водозащищенность	220

ченных для установки на судах, проводят по методике и нормам, утвержденным в установленном порядке.

Испытание на брызгозащищенность изделий электротехники на напряжение до 1000 В проводят по СТ СЭВ 778-77.

6-4. КЛАССИФИКАЦИЯ И КОДИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Современный уровень развития техники, все более углубляющиеся разделение труда и специализация привели к тому, что в создании законченных изделий участвуют десятки и сотни предприятий и организаций. Это диктует необходимость иметь единый язык — единую систему классификации и кодирования документации, изделий и материалов, построенную на единых классификационных принципах.

В настоящее время вся промышленная и сельскохозяйственная продукция включена в «Общесоюзный классификатор промышленной и сельскохозяйственной продукции (ОКП)». Классификатор имеет высшие классификационные группировки продукции (ВКГ ОКП), которые кодируются шестью цифровыми десятичными знаками (разрядами), и ассортиментную номенклатуру, т. е. конкретные наименования продукции, называющуюся идентифицированной частью (И ОКП) или внутривидовыми группировками отрасли, и кодирующуюся четырьмя цифровыми десятичными знаками (разрядами).

Для продукции каждой отрасли промышленности и сельского хозяйства в ОКП определены наиболее существенные признаки, по которым осуществляется классификационное деление. Для каждого класса продукции установлен соответствующий порядок его последовательной конкретизации.

Таким образом, наименования и коды продукции в полной номенклатуре составляют 10-значный код.

В основу ОКП положена десятичная система классификации, согласно которой вся промышленная и сельскохозяйственная продукция подразделяется на 100 классов в зависимости от особенностей производства, свойств и назначения продукции. Каждый класс подразделяется на 10 подклассов, каждый подкласс — на 10 групп, каждая группа — на 10 подгрупп и каждая подгруппа — на 10 видов. Классы обозначаются двумя цифрами, а подклассы, группы, подгруппы и виды — одной. Общая структура кодового обозначения продукции в ОКП имеет структуру, представленную в табл. 6-20.

Таблица 6-20

Высшие классификационные группировки (ВКГ ОКП)	Дальнейшая конкретизация видовой группировки продукции (И ОКП)

Коды ВКГ ОКП изданы издательством «Статистика» в 1977 г. Полную номенклатуру классов промышленной продукции в отрасли разрабатывают головные организации соответствующих отраслей. В частности,

по вопросам классификации электротехнических изделий головной организацией является ВНИИИнформэлектро.

Для классификации электротехнических изделий в ОКП выделены классы:

33 — машины электрические;

34 — оборудование и материалы электротехнические;

35 — продукция кабельная.

Каждый из указанных классов разделен на 10 подклассов по назначению и применению электротехнической продукции в соответствии со сложившейся системой планирования производства.

В связи с тем что из названных классов класс 34 является самым многономенклатурным (он включает 1846 группировок) и не имеет на уровне подклассов резервной емкости, а также в связи с необходимостью отразить сложившуюся систему планирования запасных частей для электротехнического оборудования, классификация запасных частей осуществлена в подклассе 9 класса 33.

Класс 33 машины электрические имеет подклассы:

331000 — машины электрические малой мощности;

332000 — электродвигатели переменного тока мощностью от 0,25 до 100 кВт;

333000 — электродвигатели переменного тока мощностью свыше 100 кВт;

334000 — электродвигатели взрывозащищенные, врубово-комбайновые и электробурь;

335000 — электродвигатели крановые и электрические машины для тягового оборудования;

336000 — машины электрические постоянного тока;

337000 — генераторы переменного тока, преобразователи, усилители электромашины, электростанции и электроагрегаты питания;

338000 — машины электрические крупные, агрегаты электромашины, турбо- и гидрогенераторы;

339000 — запасные части к электрическим машинам и оборудованию электротехническому.

Подобным же образом продукция, отнесенная к одному подклассу, например машины электрические малой мощности, подразделяется по определенным признакам на подгруппы:

331100 — машины электрические специализированные и т. д.

Далее продукция одной группы подразделяется на подгруппы:

331110 — электродвигатели для электробытовых приборов;

331120 — то же, не вошедшие в подгруппу 331110;

331130 — электродвигатели для звукокиноаппаратов;

331140 — электродвигатели для машин и приборов различного назначения;

331150 — электродвигатели общепромышленного применения.

Далее электродвигатели одной подгруппы подразделяют на виды:

331151— электродвигатели серии АОЛ;
331152— электродвигатели единой серии 4А;

331153— электродвигатели шаговые;
331154— серводвигатели;
331155— электродвигатели гистерезисные.

Одним из номенклатурных классов ОКП является класс 34, который подразделяется на подклассы:

341000— трансформаторы и трансформаторное оборудование, аппаратура высоковольтная, силовая преобразовательная техника, приборы силовые полупроводниковые, детекторы ядерных и нейтронных излучений, хемотроники (электрохимические преобразователи информации);

342000— аппараты электрические на напряжение до 1000 В;

343000— комплектные устройства на напряжение до 1000 В;

344000—оборудование специальное технологическое, шинопроводы низкого напряжения;

345000 — электротранспорт (кроме средств городского транспорта и мотор-вагонных поездов), электрооборудование для электротранспорта и подъемно-транспортных машин;

346000 — оборудование светотехническое и изделия электроустановочные, лампы электрические, изделия культурно-бытового назначения и хозяйственного обихода;

348000— источники тока химические и физические, генераторы электрохимические и термоэлектрические;

349000— материалы и изделия электроизоляционные, электроугольные и электрометаллокерамические.

Кабельная продукция (класс 35) подразделяется на:

351000— провода неизолированные;
352000— кабели силовые на напряжение до 1 кВ (типа СРГ, ВРГ, НРГ);

353000— кабели силовые на напряжение 1 кВ и выше (бронекабели);

354000— кабели силовые гибкие (шланговые и врубовые);

355000— провода и шнуры силовые;

356000— кабели управления, контроля, сигнализации; кабели и провода компенсационные;

357000— кабели, провода и шнуры связи;

358000— кабели, провода и шнуры междотраслевого назначения;

359000 — провода эмалированные и обмоточные.

Десятиразрядный код ОКП записывается в полной (ассортиментной) номенклатуре: два знака — пробел — четыре знака — пробел — четыре знака.

Присвоение кода ОКП осуществляется согласно установленному порядку, регламентированному положением об отраслевой системе ведения общесоюзного классификатора.

6-5. СТАНДАРТИЗАЦИЯ ТЕРМИНОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЙ И БУКВЕННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Система стандартизации терминов и определений в электротехнике

Стандартизация электротехнических терминов, их определений и буквенных обозначений тесно связана с развитием электротехники. Широкая электрификация, развитие электропромышленности в СССР и расширение сети электротехнических учебных заведений определили еще большую необходимость в упорядочении и унификации электротехнической терминологии для использования в производстве и в эксплуатации, в литературе, в стандартах и в другой нормативно-технической документации, а также в обучении электротехнических кадров.

Госстандарт СССР рассмотрел в 1957 г. совместно с заинтересованными министерствами и ведомствами состояние стандартизации терминологии в электротехнике и утвердил комплексный план работы в этой области на ряд лет. Этим планом была предусмотрена разработка стандартов на термины, общие для всей электротехники и стандартов на термины для соответствующих подотраслей электротехники.

В результате выполнения указанного комплексного плана в СССР по состоянию на 1 января 1980 г. имеется серия электротехнических терминологических стандартов, насчитывающая более 30 государственных стандартов.

Система стандартизации электротехнических терминов предусматривает введение стандарта «Электротехника, основные понятия. Термины и определения», устанавливающего термины, общие для всей электротехники, включая электронику, энергетику и электрификацию народного хозяйства. В развитие этого стандарта введены стандарты, устанавливающие термины и определения, относящиеся к определенным отраслям электротехники, например стандарт «Электрооборудование. Основные понятия. Термины и определения» и стандарт «Энергетика и электрификация народного хозяйства. Основные понятия. Термины и определения».

В дополнение к указанным имеются стандарты, устанавливающие термины и определения для отдельных подотраслей электротехнической промышленности.

В ГОСТ 19880-74 «Электротехника. Основные понятия. Термины и определения», в основу которого положена рекомендация «Теоретическая электротехника. Терминология» КТТ Академии наук СССР (вып. 59. Изд-во АН СССР, 1962 г.), предусматриваются термины и основные понятия в области электромагнитных явлений; термины электрических, электронных и магнитных цепей; термины электромагнитных процессов в электрических и магнитных цепях и средах и др.

В ГОСТ 19431-74 «Энергетика и электрификация народного хозяйства. Основные понятия. Термины и определения» устанавливаются термины и определения, относящиеся к энергоснабжению и электроснабжению; видам электрических станций; линиям электропередачи, электрическим сетям и тепловым сетям; видам приемников и потребителей энергии; характеристикам производства и потребления электроэнергии и тепловой энергии и т. д.

В ГОСТ 18311-72 «Электрооборудование. Основные понятия. Термины и определения» даны общие понятия; виды электрооборудования и электротехнических устройств; параметры, свойства и характеристики; условия эксплуатации; условия работы и режимы работы.

В стандартах на термины и определения для соответствующих подотраслей электротехники, а именно: на электрические машины, трансформаторы, электрические аппараты, электротермические установки, магнитные усилители, химические источники тока, кабели и провода, электротехнические материалы, бытовые электрические приборы и др., как правило, даны разделы — общие понятия, конструктивные элементы (части) изделий, режимы, параметры и характеристики или свойства изделий, условия эксплуатации и т. д.

Во многих стандартах на термины и определения той или иной подотрасли электротехники даны в виде приложения общие понятия, взятые из стандартов, относящихся ко всей электротехнике (для справок), без которых термины и определения данной подотрасли понимать будет затруднительно.

В ряде стандартов на термины и определения одновременно установлена принципиальная классификация видов электротехнических изделий данной подотрасли (в виде разделов в стандартах).

В отдельных стандартах, кроме того, дается в виде приложения графическое изображение (график) классификации видов изделий в данной подотрасли электротехники (например, такой график приведен в виде приложения к ГОСТ 18624-73 «Реакторы электрические. Термины и определения»), или другие графические материалы,

например в ГОСТ 16703-79 «Приборы и комплексы световые. Термины и определения» в приложении даны чертежи плоскостей (меридиальная, экваториальная и др.) и защитных углов светильников.

В отдельных подотраслях электротехники стандартизованы (в виде отдельного стандарта) термины и определения деталей и сборочных единиц, например ГОСТ 21888-76 «Машины электрические вращающиеся. Щеточный токостемник. Термины и определения».

Для отдельных стандартизованных терминов в стандарте приведены в качестве справочных их краткие формы, которые разрешается применять в случае, если исключена возможность их различного толкования.

Буквенные обозначения в электротехнике

В 1961 г. утвержден стандарт на буквенные обозначения основных величин, применяемых в электротехнике (ГОСТ 1494-61), взамен действовавшего ранее рекомендательного стандарта (ГОСТ 1494-49). Он послужил основой для упорядочения обозначений во всей электротехнической (научной, технической, информационной и учебной) литературе и документации.

В ГОСТ 1494-61 было внесено много изменений и дополнений в сравнении с ранее действовавшим стандартом с учетом буквенных обозначений электротехнических величин, принятых Международной электротехнической комиссией (МЭК) в 1956 г.

В связи с утверждением ГОСТ 19880-74, в котором произведено обновление ряда терминов в электротехнике, — утверждением рекомендацией СЭВ РС 4472-74 по буквенным обозначениям в электротехнике, возникла настоятельная необходимость в пересмотре ГОСТ 1494-61 и увязке его с перечисленными нормативно-техническими документами.

В связи с изложенным Госстандарт СССР утвердил стандарт ГОСТ 1494-77 взамен ГОСТ 1494-61 на буквенные обозначения в электротехнике (см. § 1-9).

Раздел 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВОЙ ТЕХНИКИ

СОДЕРЖАНИЕ

7-1. Общие положения по определению экономической эффективности новых электроизделий
Место и роль расчетов экономической эффективности при разработке новых электроизделий (249). Определение го-

249

дового экономического эффекта (250).
Выбор базы для сравнения и условия сопоставимости вариантов (250). Учет фактора времени (251).

7-2. Определение затрат по изготовлению и эксплуатации электроизделий

251

- Состав капитальных вложений и текущих затрат по изготовлению новых электроизделий (251). Себестоимость изготовления электроизделий (252). Определение затрат по эксплуатации электроизделий (256)
- 7-3. Предельные цены и надбавки к ценам за качество электроизделий 257
Расчет предельных цен на новое электроизделие (257). Расчет надбавки к цене на новое изделие (257). Ступенчатые цены. Лимитная цена (258)
- 7-4. Сводный анализ эффективности новых электроизделий 259
Технико-экономические показатели сравниваемых вариантов электроизделий (259). Пример определения годового экономического эффекта от внедрения в народное хозяйство нового электродвигателя (259). Определение эффективности новых электроизделий на основе метода балльно-индексной оценки (260)
- 7-5. Методика экономической оптимизации проектируемых электроизделий 261
Матрица экономической оптимизации (261). Методы определения значимости показателей и мероприятий по повышению эффективности электроизделий (261). Функционально-стоимостный анализ (ФСА) (262)
- 7-6. Особенности определения экономического эффекта мероприятий по совершенствованию технологии производства 262
Список литературы 263

7-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЙ

Место и роль расчетов экономической эффективности при разработке новых электроизделий

Органической составной частью всего комплекса работ по созданию новых электроизделий является расчет и анализ их эффективности.

Определение эффективности новых электроизделий осуществляется на основе единых методических принципов, сформулированных в методике (основных положениях) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений, утвержденной постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике, Госпланом СССР, Академией наук СССР и Государственным комитетом Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий от 14 февраля 1977 г. № 48/16/13/3.

Согласно данной методике к новой технике относятся результаты научных исследований и прикладных разработок, содержащие изобретения и другие научно-технические достижения, а также новые и усовершенствованные технологические процессы производства, орудия и предметы труда, способы организации производства и труда, обеспечивающие при их использовании повышение технико-экономических показателей производства или решение социальных и других задач развития народного хозяйства.

Эффективность нового изделия или нового технологического процесса определяется на основе совокупного учета экономической эффективности (экономики народно-хозяйственных затрат), социальной эффективности (улучшение и оздоровление условий труда, повышение уровня механизации

и автоматизации производства, гигиеничность и безопасность новой техники при ее изготовлении и в эксплуатации и т. д.), экологической эффективности (влияние новой техники на окружающую среду: уровень шума, вибрации, вредные выделения и т. д.), научно-технической значимости (получение авторских свидетельств, возможность патентования за рубежом, уровень качества и т. д.).

Эффективность от внедрения новых разработок определяется на основе учета всех этих четырех видов эффективности на всех стадиях «жизненного» цикла нового изделия, в состав которого входят:

разработка и освоение в производстве нового изделия;
промышленное (серийное) изготовление нового изделия;
использование нового изделия у потребителя.

Расчеты и анализ эффективности новых электроизделий производятся:

до начала разработки нового электроизделия. При этом определяется предполагаемая эффективность от использования его в народном хозяйстве. Результаты расчетов эффективности на этой стадии являются показателями целесообразности проведения работ по созданию нового изделия с установленными принципиальными положениями по его разработке и ожидаемому уровню технических показателей (мощность, потери электроэнергии, ресурс работы, надежность и т. д.);

в процессе разработки нового изделия. На основе расчетов эффективности устанавливается целесообразность принятия различных технических решений (выбор материала, типа обмотки и т. д.);

по окончании разработки нового изделия определяется ожидаемая эффективность от внедрения его в народное хозяйство. По результатам расчета ожидаемой эффективности устанавливаются целесообразность постановки нового изделия на промышленное производство, масштабы его изготовления и области целесообразного применения;

по результатам использования новых изделий у потребителей определяется фактическая эффективность, свидетельствующая о действительной народнохозяйственной экономии от внедрения новых изделий в народное хозяйство.

Определение экономического эффективности нового электроизделия осуществляется путем сравнения с соответствующими аналогами при соблюдении условий сопоставимости и учета фактора времени.

Расчет и анализ эффективности нового электроизделия осуществляется в следующей последовательности:

1) расчет годового экономического эффекта от производства и использования нового электроизделия;

2) расчет предельных цен на новое изделие и надбавки к цене за качество;

3) сводный анализ эффективности нового электроизделия, осуществляемый на основе учета совокупности технико-экономических показателей, а также использования в ряде случаев метода балльно-индексной оценки.

Для выработки целенаправленной программы работ по повышению эффективности существующих конструкций электроизделий может быть использована система матриц оптимизации, создаваемая на основе комплексного технико-экономического анализа.

Определение годового экономического эффекта

Расчет годового экономического эффекта $\mathcal{E}$ от производства и использования нового электроизделия производится по следующей формуле [7-1]:

$$\mathcal{E} = \left[3_1 \frac{B_2}{B_1} \frac{p_1 + E_H}{p_2 + E_H} + \frac{(I'_1 - I'_2) - E_H (K'_2 - K'_1)}{p_2 + E_H} - 3_2 \right] A_2.$$

Здесь 3_1 , 3_2 — приведенные затраты базового и нового электроизделий, руб. Состав и методика расчета этих затрат рассматриваются в § 7-2;

B_2/B_1 — коэффициент учета роста производительности средства труда, использующего новое электроизделие по сравнению с аналогом;

$(p_1 + E_H)/(p_2 + E_H)$ — коэффициент учета изменения срока службы нового электроизделия по сравнению с аналогом;

p_1 , p_2 — доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление

(реновацию) базового и нового электроизделий ($p = 1/T_{сл}$);

где $T_{сл}$ — срок службы электроизделия с учетом морального износа, лет;

E_H — нормативный коэффициент эффективности (0,15);

I'_1 , I'_2 — текущие издержки потребителя при использовании базового и нового электроизделий в расчете на объем продукции, производимой с помощью нового электроизделия, руб. Издержки по базовому варианту определяются с учетом B_2/B_1 ;

K'_1 , K'_2 — сопутствующие капитальные вложения у потребителя (без учета стоимости рассматриваемого электроизделия) при использовании базового и нового электроизделий в расчете на объем продукции, производимой с помощью нового электрооборудования, руб.;

A_2 — годовой объем производства новых средств труда в расчетном году, в натуральных единицах. За расчетный год принимается второй или третий год серийного выпуска нового электроизделия.

Выбор базы для сравнения и условия сопоставимости вариантов

За базу сравнения при определении годового экономического эффекта принимаются:

на этапе выбора варианта разработки нового электроизделия, при принятии решения о постановке на производство новой техники — показатели лучшей техники, спроектированной в СССР (или зарубежной техники, которая может быть закуплена в необходимом количестве или разработана в СССР на основе приобретения лицензии), имеющей наименьшие приведенные затраты в расчете на единицу продукции (работы), выпускаемой с помощью этой техники. В случае отсутствия проектных разработок в СССР и невозможности использования зарубежного опыта в качестве базы сравнения принимаются показатели лучшей техники, имеющейся в СССР;

на этапе принятия решения о внедрении нового электроизделия у конкретного потребителя — показатели заменяемой техники.

При расчете и анализе эффективности должна быть обеспечена сопоставимость сравниваемых вариантов по:

объему производимой с помощью новой техники продукции (работы);
качественным параметрам;
фактору времени;
социальным факторам производства и использования продукции, включая влияние на окружающую среду.

На производительность средства труда, использующего электроизделие, влияют такие показатели, как мощность электрооборудования, изменение его пусковых характеристик, плавность и диапазоны регулирования и т. д.

При определении стоимостных показателей сравниваемых конструкций должны использоваться одни и те же методы расчета, цены, тарифные ставки и другие нормативы одного уровня.

Учет фактора времени

Учет фактора времени при определении годового экономического эффекта нового электроизделия имеет место в тех случаях, когда капитальные вложения осуществляются в течение ряда лет, а также когда имеет место изменение текущих издержек по годам эксплуатации при использовании электроизделия у потребителя.

Учет фактора времени осуществляется путем приведения к началу расчетного года капитальных и текущих затрат на разработку, изготовление и использование сравниваемых электроизделий.

Такое приведение осуществляется путем умножения (деления) затрат соответствующего года на коэффициент приведения, определяемый по формуле

$$\alpha_t = (1 + E)^t,$$

где α_t — коэффициент приведения; E — норматив приведения (0,1); t — число лет, отделяющее затраты данного года от начала расчетного года.

Затраты, осуществляемые до начала расчетного года, умножаются на коэффициент приведения (α_t), а после начала расчетного года делятся на этот коэффициент.

Например, разработка и освоение производства нового изделия займут 4 года, начало работ в 1978 г., второй год серийного производства — 1982 г. Стоимость работ предполагается равной 85 тыс. руб., в том числе по годам: 1978—10 тыс. руб.; 1979—15 тыс. руб.; 1980—40 тыс. руб.; 1981—20 тыс. руб.

Приведенные капитальные затраты на разработку и освоение нового изделия составят:

$$\begin{aligned} & 10(1 + 0,1)^{4-1} + 15(1 + 0,1)^{4-2} + \\ & + 40(1 + 0,1)^{4-3} + 20(1 + 0,1)^{4-4} = \\ & = 95,46 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Таким образом, при расчете экономической эффективности нового изделия затраты на разработку и освоение будут учтены в сумме не 85, а 95,46 тыс. руб.

Учет фактора времени, следовательно, стимулирует к сокращению длительности разработки и освоения новых изделий.

Приведенные капитальные вложения используются только для оценки экономической эффективности, но не могут служить основанием для изменения сметной стоимости работ.

В табл 7-1 приводятся значения коэффициентов приведения по фактору времени.

Таблица 7-1

Коэффициенты приведения по фактору времени
[расчитанные по формуле $\alpha_t = (1 + E)^t$]

t	α_t	$1/\alpha_t$	t	α_t	$1/\alpha_t$
1	1,1000	0,9091	6	1,7716	0,5645
2	1,2100	0,8264	7	1,9437	0,5132
3	1,3310	0,7513	8	2,1436	0,4665
4	1,4641	0,6830	9	2,3579	0,4241
5	1,6105	0,6209	10	2,5937	0,3855

7-2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЙ

Состав капитальных вложений и текущих затрат по изготовлению новых электроизделий

Расходы по изготовлению сравниваемых электроизделий учитываются как приведенные затраты (Z_1, Z_2).

Приведенные затраты представляют собой сумму себестоимости изготовления и нормативной прибыли завода-изготовителя:

$$Z = C + E_n K,$$

где Z — приведенные затраты при изготовлении электроизделия, руб.; C — полная себестоимость электроизделия, руб.; K — удельные (в расчете на единицу изделия) капитальные вложения в производственные фонды и другие единовременные затраты, предшествовавшие серийному изготовлению электроизделия, руб.; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, принимаемый единым по всему народному хозяйству и равный 0,15.

В состав капитальных вложений завода-изготовителя входят стоимость его основных и оборотных фондов, а также расходы, связанные с проведением исследований, разработкой и освоением в производстве нового изделия.

В расчетах экономической эффективности допускается определение лишь той части капитальных вложений, которая претерпевает изменения в сравниваемых вариантах.

Во многих случаях в составе капитальных вложений достаточно учесть лишь следующие затраты: 1) расходы на разработ-

Таблица 7-3

Перечень преysкурантов цен

Наименование преysкуранта	№ преysкур- ранта
Чугун и ферросплавы	01-01
Сталь обыкновенного качест- ва	01-02
Качественная сталь	01-03
Цветные металлы, сплавы и порошки	02-01
Прокатно-тянутые и прессо- ванные изделия из цветных ме- таллов и сплавов (ч. I и II)	02-06
Химическая продукция	05-01
Изделия и детали из пласти- ческих масс	05-03
Лакокрасочные материалы	05-04
Тарифы на электрическую и тепловую энергию	09-01
Машины электрические	15-01
Аппаратура электрическая высоковольтная	15-03
Генераторы электрические	15-02
Аппаратура электрическая низковольтная	15-04
Трансформаторы, реакторы	15-05
Кабельные изделия	15-09
Электронизоляционные изде- лия	15-10
Электровакuumные и полупро- водниковые приборы	16-03
Подшипники	21-02
Оборудование	18-01
Отходы:	
черных металлов	01-08
цветных металлов	02-05
Транспортные средства	19-06
Инструменты, измерительные приборы	18-05
Редукторы	19-03
Средства вычислительной техники	17-08

Таблица 7-4

Расчет основной заработной платы производственных рабочих

№ п/п	Вид работы	Средний разряд	Средняя часовая ставка	Норма времени	Сумма

Часовые ставки рабочих приведены в табл. 7-5 и 7-6.

Таблица 7-5

Часовые тарифные ставки рабочих (в копейках)

Условия труда	Разряды					
	1	2	3	4	5	6
На работах с нормальными условиями труда:						
для сель- щиков	44,7	48,7	53,9	59,6	67,0	76,7
для повре- менщиков	41,8	45,5	50,8	55,7	62,7	71,7
На работах с тяжелыми и вредными условиями труда:						
для сель- щиков	50,3	54,8	60,6	67,0	75,4	86,3
для повре- менщиков	47,1	51,2	56,6	62,7	70,5	80,7
На работах с особо тяжелыми и особо вредными условиями труда:						
для сель- щиков	55,7	60,6	67,0	74,2	83,5	95,5
для повре- менщиков	52,1	56,6	62,7	69,3	78,0	89,3

Таблица 7-6

Часовые тарифные ставки для рабочих, занятых на станочных работах в машиностроительной промышленности (в копейках)

Условия труда	Разряды					
	1	2	3	4	5	6
На работах с нормальными условиями труда:						
для сель- щиков	50,3	54,8	60,6	67,0	75,4	86,3
для повре- менщиков	47,1	51,2	56,6	62,7	70,5	80,7
На работах с вредными усло- виями труда:						
для сель- щиков	53,0	57,6	63,7	70,5	79,4	90,8
для повре- менщиков	49,5	53,9	59,6	65,9	74,2	84,9

лению электроизделия; t_i — трудоемкость i -го вида работ; z_i — средняя часовая тарифная ставка по каждому виду работ; η_d — коэффициент, учитывающий ряд доплат.

На стадии проектирования определение трудоемкости и заработной платы по изготовлению новой машины нередко затруднительно. Указанные затраты могут быть найдены при этом аналитическим путем на основе сравнения разрабатываемой конструкции с близкой в конструктивно-технологическом отношении существующей конструкцией. Зная трудоемкость и сложность изготовления изделия-аналога, можно установить виды работ, характер и степень изменения их объема. Например, трудоемкость изготовления выпускаемого электродвигателя составляет 15 ч. Известно, что новая конструкция отличается от существующих большей сложностью выполнения обмоточных работ и что удельный вес последних составляет 40% всей трудоемкости. Путем анализа выполнения обмоточных работ в новой и существующей конструкциях устанавливаем степень возрастания их объема (например, на 20%), следовательно, примерная трудоемкость изготовления нового изделия

$$\sum_{i=1}^m t_i = 15(1 + 0,4 \cdot 0,2) = 16,2 \text{ ч.}$$

Расчет основной заработной платы ведется в табл. 7-4.

Дополнительная заработная плата производственных рабочих $I_{3, \text{доп}}$ включает оплату отпуска, льготных часов подростков, оплату перерывов в работе кормящих матерей,

оплату времени выполнения государственных и общественных обязанностей

$$I_{з,п}^{\text{доп}} = I_{з,п}^{\text{осн}} \eta_{\text{доп}},$$

где $\eta_{\text{доп}}$ — коэффициент, учитывающий перерасчитанные виды оплаты.

Начисление на социальное страхование

$$I_c = (I_{з,п}^{\text{осн}} + I_{з,п}^{\text{доп}}) \eta_c,$$

где η_c — коэффициент отчислений на социальное страхование.

Особенностью специальных инструментов и приспособлений является то, что они изготовляются по специальным чертежам и техническим условиям только для производства данной конструкции изделия. Затраты по этой статье себестоимости определяются на основе данных о стоимости различных видов необходимого специального оснащения (штампов, моделей, пресс-форм и т. д.), норм их расхода и количества подлежащих изготовлению изделий

$$I_{\text{сп,осн}} = \sum_1^f \frac{K_{\text{сп,осн}}}{n_{\text{изн}}},$$

где $K_{\text{сп,осн}}$ — стоимость специального оснащения каждого вида; f — количество наименований специального оснащения; $n_{\text{изн}}$ — срок службы данного вида оснащения до полного износа.

В случае когда

$$n_{\text{изн}} > n_K,$$

где n_K — количество изделий данной конструкции, подлежащих выпуску с помощью данного вида спецоснащения,

$$I_{\text{сп,осн}} = K_{\text{сп,осн}}/n_K.$$

Стоимость специального оснащения должна быть погашена в срок не более двух лет.

На статью «Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования» относятся затраты на содержание, амортизацию и текущий ремонт производственного и подъемно-транспортного оборудования, цехового транспорта, а также затраты по использованию быстроизнашивающихся инструментов и приспособлений и другие расходы:

$$I_{\text{м,ч}} = \sum I_{\text{м,ч}} t,$$

где $I_{\text{м,ч}}$ — стоимость одного машино-часа работы соответствующего оборудования; t — трудоемкость изготовления изделия на данном оборудовании, ч.

В ряде случаев допускается определение расходов на содержание и эксплуатацию оборудования косвенным путем, а именно:

$$I_{\text{с,об}} = I_{з,п}^{\text{осн}} \eta_{\text{с,об}},$$

где $\eta_{\text{с,об}}$ — процент расходов на содержание оборудования по отношению к основной зарплате производственных рабочих.

Цеховые расходы I_c включают затраты на содержание цехового персонала (ИТР,

служащих, младшего обслуживающего персонала), амортизацию, текущий ремонт и содержание здания цеха, сооружений, инвентаря общецехового назначения и т. д.

$$I_c = (I_{з,п}^{\text{осн}} + I_{\text{с,об}}) \eta_c/100,$$

где η_c — процент цеховых расходов по отношению к основной зарплате производственных рабочих и расходам на содержание и эксплуатацию оборудования.

Если в уровне механизации и автоматизации производства отдельных изделий нет больших различий, возможно распределение цеховых расходов пропорционально основной заработной плате производственных рабочих:

$$I_c = I_{з,п}^{\text{осн}} \eta'_c/100,$$

где η'_c — процент расходов по отношению к основной зарплате производственных рабочих.

В составе общезаводских расходов $I_{\text{зав}}$ учитываются затраты по общему управлению предприятием: заработная плата с начислениями персоналу заводу управления, амортизация, содержание и текущий ремонт зданий, сооружений и инвентаря общезаводского назначения, конторские, типографские, почтово-телеграфные, телефонные и другие расходы.

При различном уровне механизации и автоматизации процессов изготовления отдельных изделий общезаводские расходы на единицу продукции $I_{\text{зав}}$

$$I_{\text{зав}} = (I_{з,п}^{\text{осн}} + I_{\text{с,об}}) \eta_{\text{зав}}/100,$$

где $\eta_{\text{зав}}$ — процент общезаводских расходов по отношению к основной зарплате производственных рабочих и расходам на содержание и эксплуатацию оборудования.

При отсутствии существенных различий в уровне механизации и автоматизации производства различных изделий общезаводские расходы распределяются пропорционально основной зарплате производственных рабочих:

$$I_{\text{зав}} = I_{з,п}^{\text{осн}} \eta'_{\text{зав}}/100.$$

Внепроизводственные расходы $I_{\text{вн}}$ учитывают затраты, связанные в основном с реализацией изготовленной продукции (тара и упаковка продукции, доставка на станцию отправления), а также некоторые другие отчисления:

$$I_{\text{вн}} = C_{\text{пр}} \eta_{\text{вн}}/100,$$

где $C_{\text{пр}}$ — производственная себестоимость изделия, образуемая как сумма всех предыдущих статей затрат; $\eta_{\text{вн}}$ — процент внепроизводственных расходов по отношению к производственной себестоимости изделия.

Таблица 7-7

Пример расчета себестоимости и цены
электроизделия

№ п/п.	Наименование статьи затрат	Сумма, руб.
1	Основные материалы	320,20
2	Покупные изделия, полуфабрикаты	45,30
3	Возвратные отходы (вычитаются)	6,40
4	Основная зарплата производственных рабочих	19,10
5	Дополнительная зарплата производственных рабочих (11,5% к статье 4)	2,20
6	Отчисления на социальное страхование (6,6% к сумме затрат по статьям 4 и 5)	1,40
7	Возмещение износа инструментов и приспособлений целевого назначения	5,80
8	Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования (220% к 4 статье)	42,00
9	Цеховые расходы (115% к статье 4)	22,00
10	Общезаводские расходы (120% к статье 4)	22,90
Итого производственная себестоимость		474,6
11	Внепроизводственные расходы (1,5% от производственной себестоимости)	7,1
Итого полная себестоимость		481,7
12	Накопления (12% от полной себестоимости)	57,8
Итого оптовая цена предприятия		539,5

Накопления $I_{\text{нк}}$ рассчитываются по плановому проценту $p_n=12\%$ по отношению к полной себестоимости изделий $C_{\text{пол}}$:

$$C_{\text{пол}} = C_{\text{пр}} + I_{\text{вн}};$$

$$I_{\text{нк}} = C_{\text{пол}} p_n / 100.$$

Таблица 7-8

Анализ себестоимости изделий

№ п/п	Наименование статьи	Новое изделие		Изделие-аналог		Изменение затрат	
		Сумма, руб.	Удельный вес, %	Сумма, руб.	Удельный вес, %	руб.	%
1	Основные материалы	2,6	8,4	2,1	9,5	+0,5	+23
2	Покупные изделия и т.д.	1,4	4,5	2,8	11,2	-1,4	-50

С января 1982 г. прибыль (накопления) будет определяться по плановому проценту (нормативу рентабельности) по отношению к полной себестоимости за вычетом прямых материальных затрат: стоимости использованных материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий, топлива и энергии.

Оптовая цена предприятия

$$C_{\text{и}} = C_{\text{пол}} + I_{\text{нк}}.$$

Расчеты, выполненные по каждой статье, сводятся по форме табл. 7-7 (с примером).

Значения $\eta_{\text{сб}}$, $\eta_{\text{ц}}$, $\eta_{\text{зав}}$, $\eta_{\text{пр}}$, p_n принимаются по данным предприятия, где предполагается производство разрабатываемого изделия.

Далее производится сравнение и анализ себестоимости нового изделия с себестоимостью изделия-аналога, выявляются размеры и причины изменений отдельных составляющих себестоимости, отмечаются изменения в структуре себестоимости.

Указанный анализ целесообразно выполнять в табл. 7-8.

Изменение затрат по отдельным статьям в процентах определяется по формуле

Таблица 7-9

Структура себестоимости электроизделий (% к производственной себестоимости)

Виды электроизделий	Производственная себестоимость	В том числе				
		Основные материалы и покупные изделия	Основная зарплата производственных рабочих	Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	Цеховые расходы	Общезаводские расходы
Электродвигатели малой мощности	100	45,0	22,5	17,5	4,5	10,5
Электродвигатели до 100 кВт	100	68,0	4,8	13,6	8,5	5,1
Электродвигатели свыше 100 кВт	100	75,0	4,4	9,1	5,9	5,6
Электродвигатели взрывозащищенные	100	60,5	8,4	15,5	7,3	8,3
Турбогенераторы	100	78,0	3,6	6,7	3,8	7,9
Гидрогенераторы	100	59,0	4,1	16,2	9,6	11,1
Трансформаторы силовые	100	77,0	6,0	9,0	3,0	5,0
Кабели силовые	100	83,6	2,1	8,5	3,2	2,6
Обмоточные провода	100	65,0	4,5	15,0	9,0	6,5
Гетинакс	100	76,9	3,0	7,4	4,6	8,1
Микалента	100	88,0	1,9	4,6	2,2	3,3
Стеклотекстолит	100	86,0	1,4	5,8	3,0	3,8
Низковольтная аппаратура	100	28,0	12,0	29,2	18,0	12,8

Таблица 7-10

Нормы амортизационных отчислений по отдельным видам основных фондов (в процентах)

Виды основных фондов	Общая норма амортизации	В том числе	
		на капитальный ремонт	на полное восстановление
Здания	2,6	1,4	1,2
Универсальные и специализированные станки	14,1	7,4	6,7
Автоматические линии	10,3	3,2	7,1
Механизированный инструмент	20,0	—	20,0
Производственный и хозяйственный инвентарь	12,5	4,5	8,0
Транспортеры ленточные	24,9	5,7	19,2
Электрокары	22,7	6,7	16,0
Автопогрузчики	25,6	9,6	16,0
Электрические машины мощностью до 100 кВт	12,6	3,1	9,5
Электрические машины мощностью свыше 100 кВт	8,1	2,8	5,3
Электрические аппараты	6,4	2,9	3,5
Гидрогенераторы	2,9	0,9	2,0
Турбогенераторы	6,5	3,0	3,5
Трансформаторы силовые	6,4	2,9	3,5
Аккумуляторы:			
стационарные:			
кислотные	9,1	3,2	5,9
щелочные	12,5	—	12,5
переносные	33,3	—	33,3
кислотные			
Лабораторное оборудование и приборы	20,0	—	20,0
Счетно-вычислительные машины	12,0	2,0	10,0

$(I_i'' - I_i')/I_i'$, где I_i'' , I_i' — затраты по i -й статье калькуляции соответственно по аналогу и новому изделию.

В табл. 7-9 приведена структура себестоимости различных видов электроизделий.

Определение затрат по эксплуатации электроизделий

При эксплуатации имеют место капитальные вложения и текущие (эксплуатационные) затраты.

К капитальным вложениям в области эксплуатации электроизделий относятся: стоимость самого электроизделия; расходы по его транспортировке к месту эксплуатации и монтажу; стоимость производственных помещений, необходимых для его эксплуатации; стоимость комплектующего оборудования;

изменение оборотных фондов (например, в части парка резервного оборудования, запасных частей вследствие изменения уровня надежности, унификации).

В сопутствующих капитальных вложениях стоимость самого электроизделия не учитывается.

Расчет капитальных вложений у потребителя может быть ограничен лишь теми составляющими их, которые изменяются в сравниваемых вариантах. Так, стоимость перевозки и монтажа спроектированного изделия, необходимой площади для его установки учитывается лишь тогда, когда они существенно разнятся от соответствующих затрат по сравниваемой конструкции.

В состав текущих (эксплуатационных) затрат C_{Σ} входят:

амортизация электрооборудования на полное восстановление I_a ;

затраты на межремонтному обслуживанию $I_{\text{обс}}$;

стоимость ремонтов I_p ;

стоимость потерь электроэнергии $I_{\text{эн}}$.

$$C_{\Sigma} = I_a + I_{\text{обс}} + I_p + I_{\text{эн}}.$$

В годовые эксплуатационные издержки амортизация на полное восстановление рассматриваемых электроизделий не входит.

В каждом конкретном случае перечень подлежащих расчету и анализу составляющих эксплуатационных затрат можно ограничить лишь теми, которые претерпевают изменения в сравниваемых вариантах.

Расчету расходов по эксплуатации нового изделия должно предшествовать выявление среднего предполагаемого числа часов его работы в течение года, срока его службы, ресурса работы, периодичности проведения ремонтов и т. д.

Размер ежегодных амортизационных отчислений определяется исходя из первоначальной стоимости электрооборудования и соответствующих норм амортизации. Последние включают как отчисления, предназначенные на полное восстановление, так и

отчисления на капитальный ремонт. Поскольку затраты на капитальный ремонт учитываются в общей сумме затрат на проведение всех видов ремонтов I_p , величина I_a включает лишь отчисления на полное восстановление.

Амортизационные отчисления в этом случае будут составлять:

$$I_a = C_{\Sigma} H'_a / 100,$$

где C_{Σ} — стоимость единицы электрооборудования; H'_a — норма амортизационных отчислений в части, предназначенной на полное восстановление, в процентах. Нормы амортизационных отчислений приведены в табл. 7-10 [7-6].

Определение амортизационных отчислений, исходя из нормы амортизации, допустимо лишь в случаях, когда сравниваемые варианты конструкций имеют одинаковый срок службы. В противном случае сумма ежегодных амортизационных отчислений по каждому из сравниваемых вариантов

$$I_a = C_{\Sigma} / T_{\text{сл}},$$

где $T_{\text{сл}}$ — срок службы электрооборудования в годах.

Стоимость потерь активной энергии

$$I_{\text{ЭН}}^a = \left(\frac{P_{\text{H}}}{\eta} - P_{\text{H}} \right) t k_{\text{a}} C_{\text{ЭН}},$$

где t — число часов работы электромашины в течение года, ч/год; k_{a} — средний коэффициент ее загрузки; P_{H} — номинальная мощность электромашины, кВт; η — КПД электромашины при коэффициенте загрузки k_{a} ; $C_{\text{ЭН}}$ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб/(кВт·ч) (применительно к тем электрическим системам и видам потребителей электроэнергии, которые будут использовать данную машину).

Если сравниваемые конструкции отличаются также и уровнем потребления реактивной энергии, то определяется стоимость компенсирующих устройств, необходимых для поднятия коэффициента мощности до нормативного уровня $\cos \varphi_0$.

Стоимость самих компенсаторов должна быть включена в состав капитальных вложений заказчика. Амортизацию же их необходимо включить в эксплуатационные затраты:

$$K_{\text{K}} = \frac{P_{\text{H}}}{\eta} (tg \varphi_1 - tg \varphi_0) k_{\text{M}} C_{\text{K}},$$

где K_{K} — стоимость компенсирующих устройств, руб. $tg \varphi_1$, $tg \varphi_0$ — тангенсы, соответствующие $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_0$, при этом $\cos \varphi_0 > \cos \varphi_1$; k_{M} — коэффициент участия в максимуме нагрузки системы; C_{K} — стоимость 1 квар реактивной мощности, руб/квар.

Амортизация компенсирующих устройств

$$H_{\text{a}}^{\text{K}} = K_{\text{K}} H_{\text{a}} / 100,$$

где H_{a} — норма амортизационных отчислений по компенсирующим устройствам, %.

7-3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЦЕНЫ И НАДБАВКИ К ЦЕНАМ ЗА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЙ

Цены на новые изделия должны стимулировать создание технически совершенной и экономически эффективной техники.

При этом различаются следующие виды цен: верхний предел цены; нижний предел цены; отпускная цена с надбавкой за качество разработанного изделия; ступенчатые и лимитные цены.

Расчет предельных цен на новое электроизделие

Верхний предел цены $C_{\text{в.п}}$ соответствует такому уровню цены на новое изделие, при котором потребителю равновыгодно

применение как базового, так и нового изделия:

$$C_{\text{в.п}} = C_0 \frac{B_2}{B_1} \frac{p_1 + E_{\text{H}}}{p_2 + E_{\text{H}}} + \frac{(H'_1 - H'_2) - E_{\text{H}} (K'_2 - K'_1)}{p_2 + E_{\text{H}}}.$$

Как видно из приведенной формулы, верхний предел цены представляет собой часть формулы для годового экономического эффекта. Там же приведены обозначения всех составляющих формулы. Методика их расчета изложена в § 7-2.

Некоторое отличие формулы цены от формулы для годового экономического эффекта состоит лишь в том, что вместо Z_1 здесь используется цена базового изделия (C_0). В качестве базового изделия принимается лучшее из освоенных производством отечественных изделий. При этом оптовая цена базового изделия корректируется применительно к уровню затрат, соответствующему началу расчетного года и установленному нормативу рентабельности по данной группе продукции.

Нижний предел цены соответствует уровню цены, при котором заводу-изготовителю равновыгодно производство как нового, так и базового изделия. Нижний предел цены компенсирует заводу затраты по изготовлению и обеспечивает получение нормативной прибыли.

Нижний предел цены $C_{\text{н.п}}$ — это оптовая цена предприятия, руб.:

$$C_{\text{н.п}} = C_{\text{пол}} (1 + p_{\text{H}}),$$

где $C_{\text{пол}}$ — полная себестоимость проектируемого электроизделия, руб; p_{H} — коэффициент нормативной прибыли (0,12).

Методика расчета себестоимости изделия приведена в § 7-2.

За базу сравнения при расчете предельных цен принимаются показатели лучшей техники, имеющие такое же функциональное назначение, как и проектируемое электроизделие.

Расчет надбавки к цене на новое изделие

Надбавки к оптовым ценам устанавливаются на новые высокоэффективные изделия, соответствующие по своим параметрам лучшим отечественным и зарубежным образцам.

Надбавка устанавливается на срок до одного года, а на продукцию особой сложности — до двух лет. При присвоении изделию в течение этого срока государственного Знака качества действие надбавки продлевается без изменения ее размера. Общий срок действия надбавки устанавливается до 4 лет, а по продукции особой сложности — до 5 лет.

Площадные надбавки к оптовым ценам определяются в зависимости от го-

Таблица 7-11

Шкалы размеров поощрительной надбавки к оптовой цене нового электроизделия

$\frac{\mathcal{E}}{Ц_n} \cdot 100$	Размеры поощрительной надбавки, % нормативной прибыли	
	за достижение минимальной границы интервала	за каждую единицу внутри интервала
15—35	50	0,20
35—55	54	0,25
55—75	59	0,30
75—95	65	0,35
95—115	72	0,45
115—135	81	0,60
135—155	93	0,75
155—175	108	0,85
175 и выше	125	—

догового экономического эффекта (см. § 7-1) в размере от 0,5 до 1,25 норматива рентабельности, принятого при определении цен для данной группы изделий, но не выше 70% размера указанного эффекта.

Поощрительные надбавки дифференцируются в зависимости от соотношения экономического эффекта $\mathcal{E}$ и оптовой цены нового изделия $Ц_n$ по шкале, приведенной в табл. 7-11 [7-7].

Размер надбавки к оптовой цене увеличивается в 1,5 раза, если производство нового изделия основано на разработках, признанных в установленном порядке открытиями или изобретениями.

При лишении объединений или предприятий права применять государственный Знак качества автоматически прекращается действие поощрительных надбавок к оптовым ценам. При повторной аттестации продукции и присвоении ей второй раз государственного Знака качества поощрительные надбавки к оптовым ценам переутверждаются в том же размере при условии улучшения технико-экономических параметров данной продукции. Если же технико-экономические параметры изделия не улучшаются, размер надбавок и срок их действия сокращаются вдвое.

Дополнительная прибыль (сумма надбавок к оптовым ценам), полученная производственным объединением (предприятием) от реализации новой высокоэффективной продукции и продукции с государственным Знаком качества, распределяется в следующем порядке: до 70% ее направляется в фонды экономического стимулирования производственных объединений (предприятий), научно-исследовательских, проектно-конструкторских и технологических организаций, а остальная часть распределяется поровну между единым фондом развития науки и техники и государственным бюджетом.

По продукции второй категории качества, а также по продукции, которая в установленный срок не аттестована, применяются скидки с оптовых цен в размере 50% суммы прибыли, получаемой от реализации

этой продукции. По истечении срока снятия с производства продукции второй категории качества скидки с оптовых цен устанавливаются в размере полной суммы прибыли. При этом продукция реализуется по ценам без скидок, а сумма этих скидок вносится в государственный бюджет.

Ступенчатые цены. Лимитная цена

По мере серийного выпуска нового изделия затраты по его изготовлению снижаются. Кроме того, с течением времени изделие морально устаревает и должно быть заменено новым, технически более прогрессивным и экономически эффективным изделием. Эти обстоятельства и отражает ступенчатая цена. Под ступенчатой ценой понимается ряд последовательно снижающихся цен, одновременно устанавливаемых на одно и то же изделие. При этом наиболее характерны три вида ступеней цены:

первый вид — цена, включающая поощрительную надбавку. Этот уровень цены соответствует первому этапу серийного производства нового изделия;

второй вид — цена без поощрительной надбавки, обеспечивающая изготовителю нормативную прибыль. Вторая ступень цены характерна для этапа устойчивого серийного производства изделия и соответствует нижнему пределу цены;

третий вид — цена со скидкой, что создает неблагоприятные условия для производства морально устаревшего изделия и стимулирует к снятию его с производства.

Цены на новую продукцию должны заинтересовывать разработчиков и предприятия в разработке, освоении и использовании технических совершенной и экономически эффективной продукции.

Вся продукция электротехнической промышленности по уровню качества подразделяется на три категории.

Высшая категория — изделия, технико-экономические параметры которых и качество изготовления превышают или соответствуют высшим отечественным и зарубежным научно-техническим достижениям.

I категория — изделия, технико-экономические параметры которых и качество изготовления соответствуют современным требованиям стандартов и технических условий и отвечающие среднему мировому уровню.

II категория — изделия, не отвечающие по своим технико-экономическим показателям и качеству изготовления современным требованиям народного хозяйства, стандарты и технические условия на которые нуждаются в пересмотре. Такие изделия подлежат модернизации или снятию с производства в установленные сроки.

Степень цены первого вида устанавливается только на изделия высшей категории качества, которым присвоен государственный Знак качества. Эта цена действует на протяжении трех лет, до переаттестации изделия. Если при этом изделие будет пе-

реведено в I или II категорию качества, надбавка снимается.

Степень цены второго вида соответствует I категории качества, а степень цены третьего вида — II категории качества.

Обязательным параметром технического задания на разработку нового изделия является лимитная цена

$$C_{\text{л}} = C_{\text{в,п}} \beta,$$

где $C_{\text{в,п}}$ — верхний предел цены нового изделия, руб.; β — коэффициент удешевления базового изделия за период до серийного выпуска нового изделия (0,8).

Нижний предел цены нового изделия не должен превышать уровень лимитной цены.

7-4. СВОДНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЙ

Технико-экономические показатели
сравниваемых вариантов электроизделий

Для анализа и оценки эффективности сравниваемых конструкций электроизделий составляется сравнительная таблица технико-экономических показателей (табл. 7-12).

Таблица 7-12

Технико-экономические показатели

Показатели	Единица	Варианты конструкций	
		проектируемые	существующие

В данной таблице группы показателей приводятся в следующей последовательности:

техничко-эксплуатационные — мощность, напряжение, частота вращения, кратность пускового момента, быстрдействие, уровень шума, КПД, коэффициент мощности, масса, габаритные размеры, точность, пределы регулирования и т. д.;

надёжности и долговечности — безотказность (интенсивность отказов, наработка на отказ), ремонтпригодность (приспособленность изделия к быстрому обнаружению и устранению неисправностей), срок службы в годах, ресурс работы в часах, допустимое число включений и отключений, гарантийный ресурс, длительность ремонтного цикла, межремонтного периода и пр.;

технологичность — материалоемкость, трудоемкость, уровень механизации и автоматизации, удельный вес ручных работ, коэффициент оснащённости, длительность производственного цикла и др.;

эстетические, эргономические — внешний вид изделия, его соответствие современному стилю, удобство обслуживания и т. д.;

стандартизации и унификации — коэффициенты стандартизации, унификации, конструктивной преемственности, повторяемости и т. д.;

патентно-правовые — показатель патентной чистоты, возможность продажи лицензии, сбыта за рубежом;

экономические: а) в производстве — затраты на освоение, длительность цикла освоения, затраты на специальное оборудование и специальное оснащение, стоимость материалов, производственная зарплата, себестоимость, отпускная цена; б) в эксплуатации — стоимость активной и реактивной энергии, обслуживания, текущих и капитальных ремонтов, амортизация, возможный ущерб от ненадежной работы, размер отсутствующих капитальных вложений; в) в народном хозяйстве — годовой экономический эффект, предельные цены, размер надбавки к цене.

Пример определения годового
экономического эффекта от внедрения
в народное хозяйство нового
электродвигателя (цифры условные)

Исходные данные для расчета приведены в табл. 7-13.

Таблица 7-13

Технико-экономические показатели сравниваемых
электродвигателей

№ п/п	Показатели	Единица	Базисное изделие	Новое изделие
1	Мощность	кВт	35	40
2	КПД	%	90,5	92,5
3	Коэффициент мощности	—	0,88	0,89
4	Масса	кг	300	400
5	Срок службы с учетом морального износа	лет	4	6
6	Себестоимость изготовления С	руб.	360	450
7	Капитальные затраты на создание и организацию производства нового изделия, всего в том числе по годам:	тыс. руб.		470
	1974			50
	1975			150
	1976			200
	1977			50
	1978			20
8	Предполагаемый объем производства: на 1978 г. A_1 » 1979 г. A_2 » 1980 г. A_3	шт.		2500 10 000 15 000

Расчет экономического эффекта Э. В качестве расчетного года принимаем второй год (1979 г.) выпуска новых электродвигателей с предполагаемым объемом производства $A_2 = 10\,000$ шт.

Затраты завода-изготовителя Z_1 по производству базового двигателя могут быть приняты равными себестоимости изготовления, т. е. 360 руб.

При изготовлении нового электродвигателя необходимо учесть капитальные затраты на соз-

дание и организацию его производства K_2 . При этом

$$Z_2 = C_2 + \frac{E_H K_2}{A_2},$$

где Z_2 — приведенные затраты по изготовлению нового изделия; C_2 — себестоимость нового изделия; E_H — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

K_2 необходимо определить с учетом фактора времени:

$$K_2 = 50 (1 + 0,1)^4 + 150 (1 + 0,1)^3 + + 200 (1 + 0,1)^2 + 50 (1 + 0,1) + 20 = 590 \text{ тыс. руб.};$$

$$Z_2 = 450 + \frac{0,15 \cdot 590 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 459 \text{ руб.}$$

Сопутствующие капитальные вложения в нашем примере имеют место в компенсирующие устройства ввиду изменения коэффициента мощности. Стоимость компенсирующих устройств составляет:

для базового двигателя

$$\frac{35}{0,905} (0,533 - 0,353) 0,25 \cdot 13,5 = 23,7 \text{ руб.};$$

для нового двигателя

$$\frac{40}{0,925} (0,5 - 0,353) 0,25 \cdot 13,5 = 21,4 \text{ руб.}$$

При этом 0,353 соответствует $\cos \varphi_0 = 0,94$, при котором предприятие не платит штрафов и не получает льгот за коэффициент мощности.

Текущие издержки рассчитаны в табл. 7-14.

Таблица 7-14

Расчет текущих издержек в эксплуатации

№ п/п	Статьи затрат	Базовое изделие, руб/год	Новое изделие, руб/год
1	Стоимость потерь активной электроэнергии	168	187
2	Амортизация компенсирующих устройств	2,37	2,14
3	Стоимость ремонтов	36	24
Итого И'		206,37	213,14

Годовой экономический эффект от внедрения в народное хозяйство нового электродвигателя составит:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \left[360 \frac{40}{35} \frac{0,25 + 0,15}{0,166 + 0,15} + \right. \\ &+ \left. \frac{(213 - 206) - 0,15 (21,4 - 23,7)}{0,166 + 0,15} - 459 \right] \cdot 10^4 = \\ &= 856 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Найдем предельные цены на новый двигатель.

Нижний предел цены

$$450 \cdot 1,12 = 505 \text{ руб.}$$

Верхний предел цены по данным расчета экономического эффекта

$$520 + 22,6 = 544,6 \text{ руб.}$$

Надбавка к цене на новое изделие в соответствии с табл. 7-11 составит 27,72 руб.

Определение эффективности новых электроизделий на основе метода балльно-индексной оценки

Преимущество метода балльно-индексной оценки состоит в том, что он дает возможность соизмерить в сравниваемых вариантах большое число показателей, в том числе и те, которые трудно поддаются денежной оценке, например чувствительность, точность, диапазон регулирования, кратность пусковых моментов и т. д. Таким образом, балльно-индексный метод позволяет

Таблица 7-15

Балльно-индексный анализ эффективности

Показатель	Индекс баллозначимости, %	Варианты конструкций			
		Балл	Взвешенный балл	Балл	Взвешенный балл

Таблица 7-16

Балльно-индексный анализ экономической эффективности силовых трансформаторов

Показатель	Индекс баллозначимости, %	Вариант 1		Вариант 2	
		Балл	Взвешенный балл	Балл	Взвешенный балл
Удельный показатель расхода металла (на 1 кВ·А)	3	9	27	6	18
Удельный вес трансформаторной стали (на 1 кВ·А)	6	10	60	6	36
Удельная трудоемкость изготовления (на 1 кВ·А)	4	8	32	5	20
Удельный вес механизованных работ	3	6	18	5	15
Длительность технологического цикла	4	7	28	4	16
Повторяемость, унифицированность	3	3	9	6	18
Долговечность	12	6	72	5	60
Срок пуска	4	5	20	4	16
Ремонтопригодность	8	3	24	4	32
Безопасность и гигиеничность в эксплуатации	9	5	45	6	54
Технический ресурс	5	7	35	6	30
Суммарные потери	9	9	81	6	54
Возможность патентования и сбыта за рубежом	2	3	6	4	8
Удельная себестоимость	5	5	25	3	15
Прибыльность	4	6	24	8	32
Рентабельность	6	4	24	6	36
Приведенные затраты	10	5	50	4	40
Срок внедрения конструкции	3	4	12	3	9
Итого		100		592	

дать более широкую, а отчасти и более глубокую оценку эффективности проектируемой конструкции, чем метод приведенных затрат, используемый при расчете годового экономического эффекта и предельных цен.

При использовании метода балльно-индексной оценки прежде всего необходимо экспертным путем установить необходимый для анализа перечень показателей и оценку в баллах. Суммарная значимость всех показателей равна 100%.

При установлении перечня анализируемых показателей, оценки их в баллах используются данные, приведенные в сравнительной таблице технико-экономических показателей (табл. 7-12).

Максимальная оценка принимается равной 10 баллам. Анализ сравниваемых конструкций электроизделий выполняется в табл. 7-16.

Эффективным является вариант, набравший большую сумму взвешенных баллов.

Пример анализа эффективности новых конструкций на основе метода балльно-индексной оценки приведен в табл. 7-16.

Экономически эффективным является первый вариант, как набравший большую сумму взвешенных баллов.

Однако к суммированию баллов по различным показателям следует подходить весьма осторожно, ибо ухудшение важных для потребителя показателей не может быть компенсировано даже значительным улучшением второстепенных показателей.

7-5. МЕТОДИКА

ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЙ

Матрица экономической оптимизации

Для выработки оптимальной стратегии по дальнейшему совершенствованию проектируемого вида электрооборудования целесообразно использовать матрицу экономической оптимизации, пример которой представлен в табл. 7-17.

Из данной матрицы видно, какие показатели, в какой очередности и за счет ка-

ких мероприятий необходимо совершенствовать для повышения эффективности асинхронных двигателей общего применения мощностью до 10 кВт

Построение матрицы экономической оптимизации осуществляется в следующей последовательности:

формулируется цель. Для матриц подобного типа целью является дальнейшее повышение эффективности рассматриваемого типа электрооборудования;

устанавливается комплекс показателей, улучшение которых способствует достижению поставленной цели — повышение эффективности;

определяется удельный вес каждого из показателей. При этом сумма весов всех показателей равна единице;

устанавливаются возможные мероприятия, способствующие улучшению показателей;

определяется значимость (удельный вес) каждого из мероприятий для совершенствования каждого из показателей. Сумма удельных весов мероприятий по каждому из показателей равна единице;

определяется значимость каждого из мероприятий для достижения поставленной цели, как сумма произведений удельных весов мероприятия на удельный вес каждого показателя. Сумма полученных таким образом удельных весов всех мероприятий равна единице.

Методы определения значимости показателей и мероприятий по повышению эффективности электроизделий

Для определения значимости показателей, мероприятий используются два метода:

1) экспертный; при использовании данного метода удельный вес каждого из показателей, значимость каждого из показателей устанавливаются на основе данных опроса экспертов — квалифицированных специалистов в области проектируемого электрооборудования;

2) метод комплексного технико-экономического анализа; при данном методе используются данные анализа структуры при-

Таблица 7-17

Матрица экономической оптимизации асинхронных двигателей мощностью до 10 кВт
(условный пример)

Показатель	Удельный вес показателя	Значение мероприятий			
		Изменение марок или расхода материалов	Совершенствование технологий	Введение средств защиты	Увеличение разнообразия двигателей
Надежность	0,4	0,4/0,16	0,1/0,04	0,3/0,12	0,2/0,08
КПД	0,3	0,5/0,15	0,3/0,09	0,1/0,03	0,1/0,03
Коэффициент мощности	0,1	0,3/0,03	0,2/0,02	0,05/0,005	0,45/0,045
Стоимость	0,2	0,7/0,14	0,1/0,02	0,1/0,02	0,1/0,02
Итого	1,0	0,48	0,17	0,175	0,175

веденных затрат по проектируемому электроизделию.

Приведенные затраты по проектируемому электрооборудованию целесообразно определять по следующей формуле:

$$З = E_H K + C_3,$$

где E_H — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (0,15);

K — капитальные вложения, включающие затраты на изготовление электроизделия и сопутствующие вложения у потребителя, руб.;

C_3 — годовые текущие эксплуатационные затраты, руб/год.

Состав перечисленных видов вложений и затрат и порядок их расчета изложены в § 7-2.

Далее определяется удельный вес каждой из составляющих. При этом приведенные затраты принимаются за 100%. Аналогичным образом определяется структура затрат по разработке и освоению в производстве, себестоимости изготовления, а также текущих и капитальных затрат при эксплуатации анализируемого электрооборудования.

Знание структуры затрат позволяет более объективно, чем экспертным методом, определить значимость улучшения показателей в матрице экономической оптимизации.

Функционально-стоимостный анализ (ФСА)

ФСА — это технико-экономический метод нахождения по специальной программе резервов уменьшения затрат на производство и эксплуатацию изделий путем исследования основных и вспомогательных функций объекта анализа и инженерного поиска наиболее экономичных технических решений их осуществления.

Объект анализа — изделие, элементы его конструкции, технология изготовления, организация производства.

При ФСА предусматривается проведение следующих работ: выбор объекта анализа; определение функций, выполняемых объектом анализа и его составляющими; выявление функциональных зон с наибольшим сосредоточением затрат; выделение основных, вспомогательных и ненужных функций в объекте анализа; разработка новых, наиболее экономичных технических решений выполнения объектом анализа его функций.

Метод ФСА характеризуют коллективное (группой специалистов) изучение материалов, связанных с конструкцией, технологией, организацией производства, эксплуатацией объекта анализа. Сопоставление важности и необходимости какой-либо функции, выполняемой объектом анализа, с затратами на ее выполнение позволяет выделить ненужные и дорогостоящие функции изделия. В процессе ФСА формируют-

ся предложения по техническим решениям наиболее рационального выполнения объема его функций.

Оптимизацию электроизделий на основе ФСА целесообразно осуществлять с использованием метода комплексного технико-экономического анализа, сущность которого была изложена выше.

7-6. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

Если изменение технологии не оказывает влияние на эксплуатационные показатели изготавливаемых изделий, то экономический эффект может быть найден по упрощенной формуле

$$\Delta = (З' - З'') A_2,$$

где $З'$, $З''$ — приведенные затраты завода-изготовителя в сравниваемых вариантах технологических процессов, руб.;

A_2 — годовой выпуск изделий на основе нового процесса в расчетном году, в натуральных единицах;

$$З = E_H K_H^{уд} + C_T;$$

E_H — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (0,15);

$K_H^{уд}$ — удельные капитальные вложения завода-изготовителя, руб.;

C_T — технологическая себестоимость изготовления электроизделия, руб.

Целесообразно определить также срок окупаемости $T_{ок}$ дополнительных капитальных затрат, необходимых для внедрения нового техпроцесса:

$$T_{ок} = \frac{K''_и - K'_и}{(C'_T - C''_T) A_2}.$$

Мероприятие эффективно, если $T_{ок} \leq T_n$. Нормативный срок окупаемости $T_n = 6,7$ года.

Размер выпуска, начиная с которого применение нового техпроцесса является экономически эффективным,

$$n_{кр} = \frac{E_H (K''_и - K'_и)}{C'_T - C''_T}.$$

В составе капитальных вложений завода-изготовителя учитываются изменяющиеся при совершенствовании технологии затраты на необходимые научно-исследовательские и проектные работы, на технологи-

ческое оборудование, специальное оснащение, производственную площадь, незавершенное производство.

Если совершенствование технологии вызывает досрочный демонтаж действующего производственного оборудования, то в составе капитальных вложений учитываются соответствующие затраты:

$$K = K_{\text{на}} - K_{\text{в}},$$

где $K_{\text{на}}$ — неамортизированная часть стоимости демонтируемого оборудования, руб;
 $K_{\text{в}}$ — выручка от реализации этого оборудования, руб.

В составе технологической себестоимости учитываются лишь те затраты, на которые внедрение нового техпроцесса оказывает непосредственное влияние. В составе технологической себестоимости обычно учитываются затраты на основные материалы, зарплату производственным рабочим, амортизацию и текущий ремонт оборудования и производственной площади, технологическую энергию, а также стоимость износа малоценных (до 50 руб.) и быстроизнашивающихся (сроком службы до 1 года) инструментов и приспособлений.

Список литературы

- 7-1. Методика (Основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. Утв. постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике, Госпланом СССР, Академией наук СССР и Государственным комитетом по делам изобретений и открытий от 14 февраля 1977 г. № 48/16/13/3. — М.: 1977. — 53 с.
- 7-2. Методика определения оптовых цен на новую продукцию производственно-технического назначения. — М.: Прейскурантиздат, 1974. — 32 с.
- 7-3. Нелидов И. Е., Фурсева В. В. Организация, планирование и управление электротехническим предприятием. — М.: Высшая школа, 1975. — 314 с.
- 7-4. Астафьев В. Е., Поволоцкий Л. Я., Хайкин В. П. Экономический механизм ускорения научно-технического прогресса. — М.: Экономика, 1977. — 231 с.
- 7-5. Экономика электротехнической промышленности/В. Е. Астафьев, А. П., Борзунов, Л. В. Игнатьев, Л. Я. Поволоцкий. — М.: Энергия, 1975. — 348 с.
- 7-6. Нормы амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства и положение о порядке планирования, начисления и использования амортизационных начислений в народном хозяйстве. — М.: Экономика. 1974. — 144 с. (Госплан СССР).
- 7-7. Поощрительные надбавки к оптовым ценам. — Экономическая газета, 1979, декабрь, № 51, с. 6.

Раздел 8

БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

8-1. Общие сведения по электробезопасности	263	приемников (277). Защитное отключение (277)	
Основные понятия и определения (263). Воздействие электрического тока на организм человека (264). Классификация электроустановок (264)		8-4. Защита от электростатических зарядов	279
8-2. Безопасность электрооборудования (безопасная техника)	265	Источники электростатических зарядов на производстве (279). Устранение опасности возникновения зарядов (280)	
8-3. Защитные меры в электроустановках	268	8-5. Электрооборудование пожароопасных помещений и установок	282
Заземление и зануление в электроустановках (268). Заземления в электроустановках напряжением выше 1000 В (269). Заземления в электроустановках напряжением до 1000 В (270). Расчет заземления (272). Заземлитель (276). Заземляющие и нулевые защитные проводники (276). Заземление и зануление переносных электро-		Классификация производств и помещений по пожарной опасности (282). Выбор электрооборудования для пожароопасных помещений (283). Классификация материалов и конструкций по степени возгораемости (283). Пожарная профилактика и тушение пожаров (286)	
		Список литературы	287

8-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Основные понятия и определения

Электробезопасность — система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от

опасного и вредного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и электростатических зарядов.

Организационные мероприятия по электробезопасности — правильная организация и внедрение безопасных методов работ; обучение и инструктаж электротехническо-

го персонала; контроль и надзор за выполнением правил техники безопасности; приемов работы; механизация и автоматизация технологических процессов.

Технические мероприятия по электробезопасности — обеспечение нормальных метеорологических условий в рабочей зоне, нормированной освещенности, применение необходимых защитных мер и средств; применение безопасных ручных электрических машин (электроинструмента), а также ограждений, блокировок коммутационных электроаппаратов, контрольно-измерительных приборов, спецодежды, спецобуви и др.

Травма, вызванная воздействием на организм электрического тока или электрической дуги, называется электротравмой.

Электротравмы возможны в результате непосредственного контакта человека с токоведущими частями электроустановки, а также в случаях прикосновения к металлическим конструктивным нетоковедущим частям электрооборудования, изоляция которого нарушена и имеет место замыкание токоведущих частей на корпус.

Прикосновение человека к токоведущим частям электроустановки может быть двухфазным (двухполюсным) и однофазным (однополюсным).

Электрическим замыканием на землю называется случайное электрическое соединение токоведущей части электроустановки непосредственно с землей, нетоковедущими проводящими конструкциями или предметами, не изолированными от земли.

Зона растекания тока замыкания на землю — зона, за пределами которой электрический потенциал, обусловленный токами замыкания, может быть условно принят равным нулю.

Напряжением относительно земли при замыкании на корпус называется разность потенциалов между этим корпусом и зоной нулевого потенциала.

В отношении воздействия на человека различают значения тока:

пороговый ощутимый ток — наименьшее значение ощутимого тока;
пороговый неотпускающий ток — наименьшее значение неотпускающего тока;
пороговый фибрилляционный ток — наименьшее значение фибрилляционного тока.

Напряжение прикосновения — напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек.

Напряжение шага — напряжение между двумя точками цепи тока, находящимися одна от другой на расстоянии шага, на которых стоит человек (на земле, на полу и т. д.).

Заземление — преднамеренное электрическое соединение с заземляющим устройством частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением.

Малое напряжение — номинальное напряжение не более 42 В, применяемое в целях уменьшения опасности поражения электрическим током.

Воздействие электрического тока на организм человека

Электрический ток, проходя через тело человека, производит тепловое, химическое и биологическое воздействие, тем самым нарушая нормальную жизнедеятельность.

Химическое действие тока ведет к электролизу крови и других содержащихся в организме растворов, что приводит к изменению их химического состава и, следовательно, к нарушению их функций.

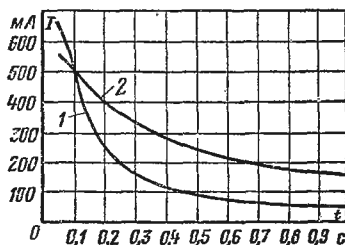


Рис. 8-1. Допустимые для человека значения тока в зависимости от продолжительности воздействия.

1 — переменный ток 50 Гц; 2 — постоянный ток.

Биологическое действие электрического тока проявляется в опасном возбуждении живых клеток организма, в частности, нервных клеток и всей нервной системы. Такое возбуждение может сопровождаться судорогами, явлениями паралича. В ряде случаев возможен паралич дыхательного аппарата (паралич мышц грудной клетки) и паралич сердца (мышцы желудочков сердца), являющийся причиной смертельного исхода. Прекращение работы сердца под действием электрического тока может быть в результате непосредственного действия тока на сердечную мышцу, когда ток проходит через область сердца, или рефлекторным — вследствие нарушения функции центральной нервной системы.

Степень поражения человека и тяжесть электрического удара зависят главным образом от значения тока, проходящего через тело человека, пути тока в теле человека и длительности его прохождения.

Зависимость допустимых для человека значений токов от продолжительности воздействия приведена на рис. 8-1.

Классификация электроустановок

Электроустановки в отношении мер безопасности разделяются [8-1] на:

электроустановки напряжением выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью (с большими токами замыкания на землю);
электроустановки напряжением выше

1000 В с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю);
 электроустановки напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью;
 электроустановки напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью.

Электромагнитными помещениями (ЭМП) называются помещения, в которых совместно могут быть установлены электрические генераторы, вращающиеся или статические преобразователи, электродвигатели, трансформаторы, распределительные устройства, щиты и пульты управления, а также относящиеся к ним вспомогательное оборудование, обслуживание которых производится специальным электротехническим персоналом. Общие требования к ЭМП изложены в [8-2].

В отношении опасности поражения людей электрическим током все помещения (в том числе и электропомещения) разделяются на следующие виды:

а) *помещения с повышенной опасностью*, характеризующиеся наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырости или проводящей пыли, токопроводящих полов (металлических, земляных, железобетонных, кирпичных и т. п.), высокой температуры, возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т. п. с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования — с другой;

б) *особо опасные помещения*, характеризующиеся наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости; химически активной среды; одновременного наличия двух или более условий повышенной опасности (п. «а»);

в) *помещения без повышенной опасности*, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную опасность и особую опасность (п. «а» и «б»).

В зависимости от назначения устройств и характера окружающей среды следует применять напряжения согласно табл. 8-1.

Таблица 8-1

Рекомендуемые номинальные напряжения
для электроустановок

Напряже- ние, В	Область применения
12	Для ручных светильников и электрифицированного ручного инструмента — в помещениях, особо опасных.
36 и 42	Для тех же целей — в помещениях с повышенной опасностью, а также для стационарных светильников, подвешенных ниже 2,5 м над полом — в помещениях особо опасных и с повышенной опасностью.
65 220	Для сварочных работ Для стационарных осветительных установок.
220, 380, 660	Для электропривода и других технических целей.

В производственных помещениях допускается применение напряжения до 1000 В при условии, что электрооборудование имеет защищенное исполнение. Применение напряжения выше 1000 В допускается, если оборудование имеет закрытое исполнение или специальные ограждения, для снятия которых необходим инструмент, или при снятии ограждений автоматически снимается напряжение с токоведущих частей.

8-2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ (БЕЗОПАСНАЯ ТЕХНИКА)

Основные требования к безопасности электрооборудования изложены в ГОСТ системы стандартов безопасности труда (ССБТ).

ГОСТ 12.2.007.0-75. ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности (см. также § 6-3).

Стандарт устанавливает общие требования безопасности к конструкции изделий, т. е. требования безопасности, предотвращающие или уменьшающие до допустимого уровня воздействия на человека: электрического тока, электрической искры и дуги, движущихся частей изделия, частей, нагреваемых до высоких температур, опасных и вредных материалов, используемых в конструкции изделия, а также опасных и вредных веществ, выделяющихся при его эксплуатации, шума, ультразвука и вибрации, электромагнитных полей и теплового, оптического и рентгеновского излучения.

В стандарте даны: общие положения, классы электротехнических изделий по способу защиты человека от поражения электрическим током, а также требования безопасности к электротехническому изделию и его частям (требования к изоляции, заземлению, к органам управления, к блокировке, к оболочкам, к зажимам и вводным устройствам, к предупредительной сигнализации, надписям и табличкам, к маркировке и различительной окраске).

ГОСТ 12.2.007.1-75. ССБТ. Машины электрические вращающиеся. Требования безопасности.

В стандарте приведены общие требования к электрическим машинам и к отдельным видам электрических машин.

Даны указания в отношении элемента для заземления, конструкции подшипниковых узлов, щеточного аппарата, защитные меры против случайных прикосновений к токоведущим частям.

Требования безопасности к турбогенераторам, гидрогенераторам и синхронным компенсаторам дополнительно включают указания:

а) о нормированном сопротивлении изоляции подшипников со стороны контактных колец относительно корпуса;

б) об устройстве элементов для заземления;

- в) о заземлении внешних трубопроводов и цвете их окраски;
- г) о расположении сигнальных ламп для систем водородного охлаждения;
- д) о вентиляции возможных мест скопления водорода;
- е) о конструкциях газопроводов и сливных маслопроводов;
- ж) об изоляции цепей термометров сопротивления и других датчиков;
- з) об освещении смотровых стекол сливных патрубков;
- и) о наличии дверей и лазов в конструкции гидрогенераторов;
- к) о конструкции подвода кабеля к аппарату щеткодержателя и оконцевании проводов внутрипанельной вторичной коммутации шкафов, сборок и устройств систем возбуждения.

Дополнительные требования к тяговым электрическим машинам включают:

- а) меры против самоотвинчивания гаек в коробках выводов;
- б) устройство, предотвращающие падение в случае поломки осевых приливов подвески;
- в) устройство нижнего люка в корпусе, обеспечивающее удобство обслуживания машины.

ГОСТ 12.2.007.2-75. Трансформаторы силовые и реакторы электрические. Требования безопасности.

Для сухих однофазных трансформаторов мощностью до 4 кВ·А и трехфазных мощностью до 5 кВ·А напряжением до 1000 В стандарт предъявляет требования:

- а) к классам и степеням защиты в соответствии с ГОСТ 12.2.007.0-75 и ГОСТ 14254-69;
- б) к отверстиям в оболочках для доступа к токоведущим частям;
- в) к заземлению токопроводящих деталей, не находящихся под напряжением;
- г) к воздушным зазорам и путям утечки тока по изоляции;
- д) к вентиляционным отверстиям;
- е) к маркировке зажимов.

Для однофазных трансформаторов мощностью свыше 4 кВ·А и трехфазных свыше 5 кВ·А и электрических реакторов стандарт содержит дополнительные требования:

- а) к коробкам зажимов для цепей защиты и сигнализации или встроенных трансформаторов тока;
- б) к лестницам для обслуживания трансформаторов и реакторов высотой более 3 м. Кроме того, изложены условия безопасной работы при монтаже, ремонте и осмотре трансформатора или реактора и противопожарные меры для масляных трансформаторов и реакторов;
- в) к окраске переключающих устройств при напряжении выше 1000 В;
- г) к элементам для заземления;
- д) к защитному устройству, предупреждающему повреждение бака при внезапном повышении внутреннего давления;
- е) к газовой защите;

ж) к расположению указателей уровня масла, газового реле, крана для отбора масла, обеспечивающие безопасные условия для доступа к ним без снятия напряжения; ГОСТ 12.2.007.3-75. ССБТ. Электрические устройства на напряжение свыше 1000 В. Требования безопасности.

Общие требования предусматривают:

- а) соответствие ГОСТ 12.2.007.0-75.
- б) прочность изоляции устройств по ГОСТ 1516.1-76;
- в) длину пути утечки внешней изоляции устройств по ГОСТ 9920-75;
- г) наличие болта для заземления.

Требования к отдельным видам устройств относятся к выключателям, разъединителям, отделителям, предохранителям, вентильным разрядникам, трубчатым разрядникам и трансформаторам тока.

Для выключателей приведены требования: к указателям положения; по условиям безопасной доливки масла в баки; к указателям уровня масла; устройствам для опускания и поднимания бака или лаза для доступа внутрь бака; к резервуарам воздушных и вакуумных выключателей; к приводам; по условиям для включения выключателей вручную.

Для разъединителей указаны требования: к блокировкам главных и заземляющих ножей; размерам рукояток ручных рычажных приводов и доступным усилиям для оператора; по фиксации положения механизма и к его указателям для ручных приводов.

Приведены требования к блокировкам отделителей.

Для предохранителей указаны требования в части предупреждения выброса пламени; состояния контактов; требования к конструкции, обеспечивающей замены их под напряжением и возможность визуального определения расплавления плавкой вставки или при помощи указателей срабатывания.

Для вентильных разрядников приведены требования о необходимости иметь предохранительное устройство, исключающее повышение давления до опасных значений, а также требования в отношении присоединения регистратора срабатывания.

Для трубчатых разрядников приведены требования к конструкции, обеспечивающей возможность крепления за открытую концевую обмотку; указан ГОСТ для зоны выхлопа разрядников и порядок их установки.

Для трансформаторов тока изложены требования в отношении предупредительных знаков о возможности появления опасного напряжения на разомкнутой обмотке и к конструкции зажимов вторичной обмотки, обеспечивающих безопасное наложение перемычки.

ГОСТ 12.2.007.4-75. Шкафы комплектных распределительных устройств и комплектных трансформаторных подстанций. Требования безопасности.

В стандарте указаны общие требования (ссылка на ГОСТ 12.2.007.0-75 и ГОСТ

14254-69) и специальные требования к шкафам КРУ и КТП. Для шкафов КРУ даны указания:

- а) о безопасности местного освещения;
- б) о всех видах блокировок разъединителей и выключателей;
- в) о заземлении;
- г) о нормах тяговых усилий при перемещении выдвижных элементов;
- д) об устройствах для запираания автоматических шторок на период ремонтных работ;
- е) об окраске приводов заземляющих частей.

Для шкафов КТП даны указания:

- а) о механической прочности шкафов;
- б) о всех видах блокировок разъединителей и выключателей;
- в) о сетчатых ограждениях;
- г) об изоляции первичных и вторичных цепей;
- д) о сигнализации состояния «Включено» и «Отключено»;
- е) о расположении рукояток приводов, аппаратуры управления и приборов измерения и сигнализации;
- ж) о заземлении кожухов токопроводов от трансформатора;
- з) о защите рубильников с ручным управлением;
- и) о приспособлениях для запираания рукояток приводов;
- к) о требованиях к термической и электродинамической стойкости выбираемых аппаратов, приборов, токоведущих частей, изолирующих опор, креплений, песуших конструкций, обеспечивающих безопасность обслуживающего персонала при возникновении нагрева, электрической дуги и выбрасываемых из аппаратов газов и масла;
- л) об установке разъединителей во вводных шкафах КТП, обеспечивающих видимый разрыв цепи;
- м) о расположении предохранителей и рядов зажимов вторичных соединений, обеспечивающих безопасные осмотр их, проверки и испытания измерительных и релейных устройств без снятия напряжения с магистралей шин вторичных соединений.

ГОСТ 12.2.007.5-75, ССБТ. Конденсаторы силовые. Установки конденсаторные. Требования безопасности.

Общие требования включают указания:

- а) о том, что силовые конденсаторы и конденсаторные установки должны отвечать требованиям ГОСТ 12.2.007.0-75;
- б) о герметичности корпусов;
- в) об устройстве для заземления металлического корпуса;
- г) об устройстве для разряда отключенного конденсатора.

К конденсаторам для повышения коэффициента мощности и для продольной компенсации предъявляются следующие дополнительные требования:

- а) о защите встроенными плавкими предохранителями;
- б) о максимальном времени разряда

конденсаторов встроенными разрядными резисторами.

К конденсаторным установкам предъявляются следующие требования:

- а) о запираании дверей конденсаторных ячеек на замок;
- б) о блокировках дверей;
- в) о блокировках разъединителей и выключателей;
- г) о групповой и индивидуальной защите от токов короткого замыкания;
- д) о разъединителях с заземляющими ножами для конденсаторных установок на напряжения выше 1000 В;
- е) о сопропвлении изоляции цепей управления и контроля;
- ж) о заземляющих элементах;
- з) о сигнализации наличия напряжения на конденсаторной установке;
- и) о разрядных устройствах;
- к) об обеспечении видимого разрыва цепи при проведении ремонтных работ;
- л) о выключателях выкатного исполнения;
- м) о необходимости изображения на двери вводной ячейки принципиальной схемы установки.

ГОСТ 12.2.007.6-75, ССБТ. Аппараты электрические коммутационные на напряжение до 1000 В. Требования безопасности.

Стандарт предусматривает:

- а) требования по ГОСТ 12.2.007.0-75;
- б) степени защиты аппаратов по ГОСТ 14255-69;
- в) температуры нагрева частей по ГОСТ 403-73;
- г) необходимость сохранения цепей заземления в выдвинутых аппаратах, встраиваемых в какое-либо устройство, до отключения их токоведущих частей;
- д) необходимость блокировок, не позволяющих выкатывать или выкатывать аппарат во включенном положении;
- е) выбор расстояний утечки и электрических зазоров для аппаратов, встраиваемых в оболочки изделий;
- ж) требования к выключателям с ручным приводом, исключающим возможность травмирования руки оператора;
- з) необходимость определения опасной зоны выхлопа аппарата.

ГОСТ 12.2.007.7-75, ССБТ. Устройства управления комплексные на напряжение до 1000 В. Требования безопасности

Стандарт распространяется на комплексные устройства управления электроприводов, предназначенные для работы от сетей напряжением до 1000 В и устанавливает следующие требования безопасности к конструкциям изделий:

- а) о фиксированном положении контактов выключателей;
- б) о закрытии рабочих контактов выключателей несгораемыми кожухами;
- в) об установке на дверях только органов управления, устройств сигнализации и измерительных приборов и необходимости наличия на них заземляющих зажимов;
- г) о расположении магнитных пускате-

лей, контакторов и выключателей, исключая взаимное воздействие друг на друга (электрическая дуга и ее пламя);

д) о выводах выключателей для присоединения к ним проводников питающей сети;

е) о рейках с зажимами для присоединения цепей управления;

ж) о способах прокладки незащищенных изолированных проводников;

з) о выводных зажимах на напряжение выше 660 В;

и) о сопротивлении изоляции цепей;

к) о предупреждающем знаке по ГОСТ 15548-70;

л) о позиционных обозначениях по принципиальной схеме на аппаратах и других электротехнических изделиях.

ГОСТ 12.2.007.11-75. ССБТ. Преобразователи электроэнергии — статические силовые. Требования безопасности.

Стандарт содержит общие и дополнительные требования:

а) необходимость блокировок дверей шкафов, препятствующих их открыванию при включенном состоянии и включению преобразователя при открытых дверях;

б) о конструкции для обеспечения безопасной проверки указателем напряжений наличия или отсутствия напряжения;

в) об электрической прочности изоляции;

г) о системах жидкостного охлаждения.

ГОСТ 12.2.007.14-75. ССБТ. Кабели и кабельная арматура. Требования безопасности.

Данный стандарт распространяется на кабели и арматуру на напряжение до 220 кВ и устанавливает требования безопасности к конструкции изделий.

В стандарте даны указания:

а) о металлических оболочках и броне;

б) об отличительной расцветке изоляции жил;

в) о соединительных, стопорных и стопорно-переходных муфтах;

г) о заземлении защитных кожухов муфт.

Кроме того, действуют следующие ГОСТ ССБТ: ГОСТ 12.2.007. 8-75 на устройства электросварочные и для плазменной обработки; ГОСТ 12.2.007.9-75 на электропечи; ГОСТ 12.2.007.10-75 на установки, генераторы и нагреватели индукционные для электротермии; ГОСТ 12.2.007.12-75 на источники тока химические; ГОСТ 12.2.007.13-75 на светотехнические изделия.

8.3. ЗАЩИТНЫЕ МЕРЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Защитными мерами в электроустановках являются: защитное заземление или зануление, защитное отключение, электрическое разделение сети, применение малых напряжений, двойная или усиленная изоляция, применение электрозащитных средств.

Заземление и зануление в электроустановках

Требования к заземлению электроустановок изложены в [8-1]. В электроустановках с изолированной нейтралью должно быть выполнено защитное *заземление* и должна быть предусмотрена возможность выявления и быстрого отыскания замыканий на землю. В электроустановках до 1000 В с глухозаземленной нейтралью в качестве защитной меры вместо защитного заземления применяется *зануление*.

Трехфазные сети до 1000 В с изолированной нейтралью, связанные через трансформаторы с сетями напряжением выше 1000 В, должны быть защищены от опасности, возникающей при повреждении изоляции между обмотками высшего и низшего напряжений трансформатора, *пробивным предохранителем* (разрядником с заземленным электродом), установленным в нейтрали или фазе на стороне низшего напряжения трансформатора.

В электроустановках до 1000 В в местах, где в качестве защитной меры применяются разделяющие или понижающие трансформаторы, их вторичное напряжение должно быть соответственно не более 380 и 42 В. При этом необходимо руководствоваться следующим:

а) от разделяющих трансформаторов разрешается питание только одного электроприемника с номинальным током плавкой вставки или расцепителя автомата на первичной стороне не более 15 А;

б) заземление (зануление) вторичной обмотки разделяющего трансформатора запрещается. Корпус необходимо заземлить (занулить).

Заземление (зануление) электроустановок следует применять:

а) при переменном напряжении 380 В и выше и постоянном напряжении 440 В и выше во всех случаях;

б) при номинальных напряжениях — переменном выше 42 В и постоянном выше 110 В — только в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках.

Заземление не требуется при номинальных напряжениях — переменном до 42 В и постоянном до 110 В, за исключением взрывоопасных установок.

Заземлению (занулению) подлежат следующие части электрооборудования;

а) корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников и т. п.;

б) приводы электрических аппаратов;

в) вторичные обмотки измерительных трансформаторов;

г) каркасы распределительных щитов, щитков, шкафов и т. п.;

д) металлические конструкции распределительных устройств, кабельные конструкции, оболочки и броня, стальные трубы электропроводки, шинопроводы, короба, тросы и другие конструкции;

е) металлические оболочки кабелей и проводов при переменном напряжении до 42 В, и постоянном до 110 В, проложенные на общих металлических конструкциях, в трубах и т. п. вместе с кабелями и проводами, оболочки которых подлежат заземлению (занулению);

ж) металлические корпуса передвижных и переносных электроприемников, а также электрооборудование, размещенное на движущихся частях станков, машин и механизмов.

Допускается не выполнять заземления (или зануления):

1) корпусов электрических машин, аппаратов и электромонтажных конструкций, установленных на заземленных (зануленных) металлоконструкциях распределительных устройств, щитах, шкафах, станинах станков, машинах и механизмов, при условии обеспечения надежного электрического контакта с заземленными (зануленными) основаниями;

2) конструкций, указанных в п. «д», при наличии надежного контакта между этими конструкциями и установленным на них заземленным (зануленным) электрооборудованием;

3) арматуры изоляторов, оттяжек, кронштейнов и осветительной арматуры при установке их на деревянных опорах ВЛ и на деревянных конструкциях открытых подстанций, если это не требуется по условиям молниезащиты;

4) съемных частей металлических каркасов, камер распределительных устройств, шкафов, ограждений и т. д., если на съемных или открывающихся частях не установлено электрооборудование либо переменное напряжение электрооборудования не превышает 42 В или постоянное 110 В (исключение составляют взрывоопасные электроустановки).

С целью выравнивания потенциалов во всех помещениях и наружных установках, где применяется заземление (зануление), строительные и производственные конструкции, трубопроводы, корпуса технологического оборудования и т. п. должны быть присоединены к сети заземления или зануления.

Заземлению (занулению) не подлежат корпуса электроприемников с двойной изо-

ляцией, а также рельсовые пути (кроме крановых), выходящие за территорию электростанций, подстанций, распределительных устройств и промышленных предприятий.

Заземления в электроустановках напряжением выше 1000 В

Заземление электроустановок напряжением выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью следует выполнять в соответствии с «Нормами допустимых напряжений прикосновения в электроустановках напряжением выше 1000 В» (табл. 8-2, строка Б).

Требуемое значение сопротивления заземляющего устройства (ЗУ) определяется по данным допустимого напряжения прикосновения согласно табл. 8-2 по уравнению

$$R_0 = U_{hg} / I_3.$$

При этом действующее значение установившегося тока однофазного замыкания на землю I_3 в сетях 110 кВ и выше определяется расчетом в соответствии с параметрами сети. Напряжение на заземлителе при наибольшем токе замыкания на землю рекомендуется ограничивать 5 кВ.

Допускается выполнение ЗУ с соблюдением требований, предъявляемых к сопротивлению ЗУ. При этом его сопротивление должно быть не более 0,5 Ом, включая сопротивление растеканию естественных заземлителей.

Для заземления оборудования и выравнивания потенциала вдоль осей оборудования открытых распределительных устройств должны быть проложены выравнивающие проводники (горизонтальные заземлители) на глубине 0,5—0,7 м, и на расстоянии 0,8—1,0 м от фундаментов и оснований оборудования в соответствии с ПУЭ (I-7-30 А и I-7-30 Б) согласно рис. 8-2. На рис. 8-3 показан сосредоточенный заземлитель.

В электроустановках напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью без компенсации емкостных токов сопротивление ЗУ при протекании расчетного тока замыкания на землю должно быть не более:

1. Если ЗУ одновременно используется для установок напряжением до 1000 В, то

$$R = 125 / I_3.$$

Таблица 8-2

Временные нормы допустимых напряжений прикосновения U_{hg} и токов через тело человека I_{hg} для расчета защитных мер в электроустановках

Тип электроустановки	Нормируемая величина, В, мА	Продолжительность воздействия, с							
		0,01—0,08	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	3,0	3—10
А. 50 Гц (до 1000 В и выше 1000 В до 35 кВ с изолированной нейтралью)	U_{hg}	650	500	250	100	75	50	36	26
	I_{hg}	650	500	250	100	75	50	6	6
Б. 50 Гц (выше 35 кВ с заземленной нейтралью)	U_{hg}	—	500	400	200	130	100	65	—

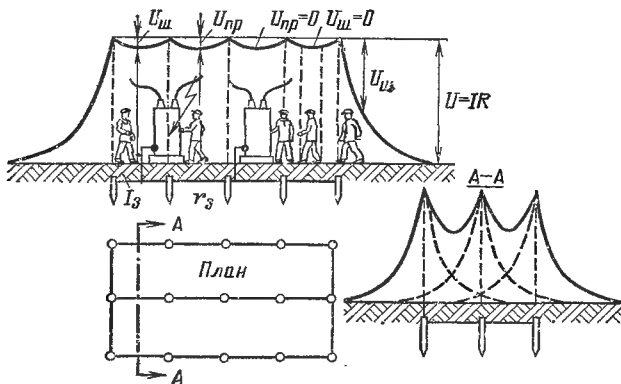


Рис. 8-2. Контурный заземлитель. Схема и графики напряжения прикосновения и шага.

2. Если ЗУ используется только для электроустановок напряжением выше 1000 В, то

$$R = 250/I_3;$$

здесь R — сопротивление ЗУ, Ом; I_3 — расчетный ток замыкания на землю, А.

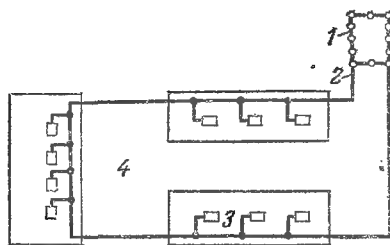


Рис. 8-3. Сосредоточенный заземлитель.

1 — заземлитель; 2 — заземляющая магистраль; 3 — заземляющие ответвления; 4 — помещение, в котором установлено электрооборудование.

В качестве расчетного можно принять ток, А, вычисленный по приближенной формуле:

$$I_3 = \sqrt{3} U (35 l_K + l_B) / 350,$$

где U — фазное напряжение сети, кВ; l_K — общая длина подключенных к сети кабельных линий, км; l_B — общая длина подключенных к сети воздушных линий, км.

В сетях с компенсацией емкостных токов сопротивление ЗУ рассчитывается аналогично. При этом в качестве расчетного следует принимать:

1) для ЗУ, к которым присоединены компенсирующие аппараты, — ток, равный 125% номинального этих аппаратов;

2) для ЗУ, к которым не присоединены компенсирующие аппараты, — остаточный ток замыкания на землю, который может иметь место в данной сети при отключении

наиболее мощного из компенсирующих аппаратов или наиболее разветвленного участка сети.

Если электроустановки выше 1000 В с изолированной нейтралью отключаются действием защиты от однофазных или междофазных замыканий, то ЗУ этих установок могут также рассчитываться по вышеприведенным формулам, при этом в качестве расчетного принимается ток срабатывания релейной защиты от однофазных или многофазных замыканий или ток плавления предохранителей. В этих случаях ток замыкания на землю должен быть не менее полуторакратного тока срабатывания релейной защиты или трехкратного номинального тока предохранителей.

Расчет ЗУ можно выполнять также в соответствии с табл. 8-2 (графа А):

$$R = U_{hg} / I_{hg}.$$

Заземления в электроустановках напряжением до 1000 В

В четырехпроводных сетях переменного тока или в трехпроводных сетях постоянного тока обязательно *глухое заземление нейтрали*.

В электроустановках с глухозаземленной нейтралью при замыканиях на заземленные части должно быть обеспечено надежное автоматическое отключение поврежденных участков сети с минимальным временем отключения. С этой целью в электроустановках до 1000 В с глухозаземленной нейтралью обязательно металлическая связь корпусов электрооборудования с заземленной нейтралью электроустановки, т. е. устройство *зануления* (рис. 8-4).

Нейтраль генератора, трансформатора (на стороне до 1000 В) должна быть присоединена к заземлителю при помощи отдельного заземляющего проводника (рабочее заземление). Сечение этого заземляющего проводника должно быть не менее указанного в табл. 8-3.

Таблица 8-3

Наименьшие размеры заземляющих и нулевых защитных проводников и электродов-заземлителей

Наименование	Медь	Алюминий	Сталь		
			в зданиях	в наружных установках	в земле
Неизолированные проводники:					
сечение, мм ²	4	6	—	—	—
диаметр, мм	—	—	5	6	10
стальные оцинкованные в асбесте, диаметр, мм	—	—	—	—	6
Изолированные провода, сечение, мм ²	1,5*	2,5	—	—	—
Заземляющие и нулевые жилы кабелей и проводов в общей защитной оболочке с фазными жилами, сечение, мм ²	1	2,5	—	—	—
Угловая сталь, толщина полки, мм	—	—	2	2,5	4
Полосовая сталь: сечение, мм ²	—	—	24	48	48
толщина, мм	—	—	3	4	4
Стальные трубы, толщина стенки, мм	—	—	2,5	2,5	3,5
Тонкостенные стальные трубы, толщина стенки, мм	—	—	1,5	2,5	Не допускается

* При прокладке проводов в трубах допускается применять сечение медных нулевых защитных проводников 1 мм², если фазные проводники имеют то же сечение.

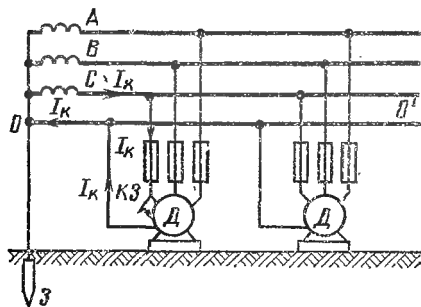


Рис. 8-4. Схема зануления.

Указанный заземлитель должен быть расположен в непосредственной близости от генератора или трансформатора. В отдельных случаях, например во внутрицеховых подстанциях, заземлитель допускается соорудить непосредственно около стены здания.

Вывод нейтрали генератора или трансформатора на щит распределительного устройства должен выполняться: при выводе фаз шинами — шиной на изоляторах, при выводе фаз кабелем (проводом) — жилой кабеля (провода). Допускается в кабелях с алюминиевой оболочкой вместо четвертой

жилы использовать оболочку. Проводимость вывода нейтрали должна быть не менее 50% проводимости вывода фаз.

Сопrotивление заземляющего устройства, к которому присоединены нейтрали генераторов или трансформаторов либо выводы источников однофазного тока, в любое время года должно быть не более 2, 4 и 8 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника постоянного тока.

При удельном электрическом сопротивлении ρ земли более 10 Ом·м допускается увеличивать указанные выше значения сопротивления 3У в отношении $\rho/100$, но не более 10-кратного.

На воздушных линиях электропередачи зануление осуществляется нулевым рабочим проводом, проложенным на тех же опорах, что и фазные провода. На концах воздушных линий (или ответвлений) длиной более 200 м, а также на вводах в здание, электроустановки которых подлежат занулению, должны выполняться *повторные заземления нулевого рабочего провода*. При этом в первую очередь используются *естественные заземлители*, например подземные части опор, а также заземляющие устройства, выполненные для защиты от грозозовых перенапряжений.

Повторные заземления нулевого провода в сетях постоянного тока должны осуществляться при помощи отдельных искусственных заземлителей, которые не должны иметь металлических соединений с подземными трубопроводами.

Общее сопротивление растеканию заземлителей всех повторных заземлений нулевого рабочего провода каждой воздушной линии в любое время года должно быть не более 5, 10 и 20 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока. При этом сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при тех же напряжениях.

Проводники для повторных заземлений нулевого провода должны иметь пропускную способность по допустимому нагреву не менее 25 А.

По механической прочности заземляющие и нулевые защитные проводники должны иметь размеры не менее приведенных в табл. 8-3.

В качестве искусственных заземлителей помимо металла допускается использовать электропроводящий бетон.

В электроустановках напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью сопротивление заземляющего устройства, используемого для заземления электрооборудования, должно быть не более 4 Ом.

При мощности генератора или трансформатора 100 кВт·А и менее заземляющие устройства могут иметь сопротивление до 10 Ом.

Таблица 8-5

Климатические коэффициенты ψ для однородной земли

Климатическая зона	Состояние земли во время измерений ее сопротивления		
	Повышенная влажность	Нормальная влажность	Малая влажность

Вертикальный электрод длиной 3 м

I	1,9	1,7	1,5
II	1,7	1,5	1,3
III	1,5	1,3	1,2
IV	1,3	1,1	1,0

Горизонтальный электрод длиной 10 м

I	9,3	5,5	4,1
II	5,9	3,5	2,6
III	4,2	2,5	2,0
IV	2,5	1,5	1,1

Примечания: 1. Заглубление электродов, т. е. расстояние от поверхности земли до верхнего конца вертикального электрода и до горизонтального электрода, равно 0,7—0,8 м.

2. I климатическая зона характеризуется средней многолетней нижней температурой (январь) от -20 до -15°C ; средней высшей температурой (июль) от $+16$ до $+18^{\circ}\text{C}$; среднегодовым количеством осадков около 40 см; продолжительностью заморозания вод от 190 до 170 дней. II климатическая зона характеризуется нижней температурой от -14 до -10°C ; высшей температурой от $+18$ до $+22^{\circ}\text{C}$; осадков 50 см; продолжительностью заморозания вод около 150 дней. III зона характеризуется нижней температурой от -10 до 0°C ; высшей от $+22$ до $+24^{\circ}\text{C}$; осадков около 50 см; продолжительностью заморозания вод около 100 дней. IV зона характеризуется нижней температурой от 0 до $+5^{\circ}\text{C}$; высшей от $+24$ до $+26^{\circ}\text{C}$; осадков от 30 до 50 см; отсутствием заморозания вод.

Расчет заземления

При расчете заземлений определяются число и длины вертикальных элементов и длины горизонтальных элементов заземлителя и размещение его на плане электроустановки.

Расчет простых заземлителей в однородном грунте выполняется в следующем порядке:

1. Вычисляются расчетный ток замыкания на землю и требуемое сопротивление ЗУ в соответствии с требованиями [8-1] — с учетом режима нейтрали, мощности источника питания и др.

2. Определяют расчетное удельное сопротивление грунта ρ с учетом климати-

ческого коэффициента (табл. 8-4 и 8-5) $\rho_{расч} = \rho_{зем} \psi$, где $\rho_{зем}$ — удельное сопротивление грунта, полученное измерением или из табл. 8-4; ψ — климатический коэффициент.

3. Рассчитывают сопротивление естественных заземлителей по формулам, приведенным в табл. 8-6.

4. Определяют сопротивление искусственного заземлителя по формуле

$$R_{из} = \frac{R_e R_{\text{н}}}{R_e - R_{\text{н}}},$$

где R_e — сопротивление естественного заземлителя; $R_{\text{н}}$ — нормированное сопротивление заземляющего устройства.

5. Определяют сопротивление одиночного вертикального заземлителя $R_{од}$ по табл. 8-6.

Сопротивление одиночного вертикального заземлителя можно определить также по номограмме рис. 8-5, а полосового заземлителя — по графикам рис. 8-6.

6. Предварительно разместив заземлители на плане, задаваясь числом их, согласно расстояниям между заземлителями, находят коэффициент использования вертикальных стержней $\eta_{ст}$ по табл. 8-7.

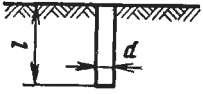
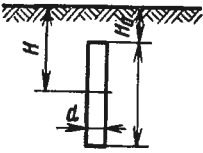
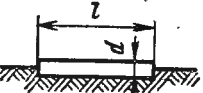
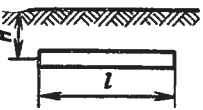
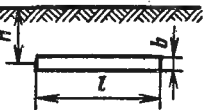
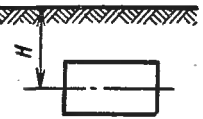
Таблица 8-4

Удельное сопротивление грунта

Грунт	Удельное сопротивление ρ , Ом·см	
	возможные пределы колебаний	при влажности 10—20 % к массе
Глина	8—70	40
Суглинок	40—150	100
Песок	400—700	700
Супесок	150—400	300
Торф	10—30	20
Чернозем	9—53	20

Таблица 8-6

Формулы для вычисления сопротивлений одиночных заземлителей растеканию тока

Тип заземлителя	Схема	Формула	Дополнительные указания
Трубчатый или стержневой у поверхности грунта		$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l \gg d$
Трубчатый или стержневой в грунте		$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H+l}{5H-l} \right)$	$H_0 > 0,5 \text{ м}$
Протяженный круглого сечения — труба, кабель и т. п. — на поверхности грунта		$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}$	$\rho \ll d$
Протяженный круглого сечения в грунте		$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{3\pi l} \ln \frac{l^2}{dH}$	$\frac{l}{H} \gg 5$
Протяженный полосовой на поверхности грунта		$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{4l}{b}$	$l \gg b$
Протяженный — полоса в грунте		$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bH}$	$\frac{l}{H} \gg 5$
Круглая пластина в грунте		$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{4D} \left(1 + \frac{2}{\pi} \times \arcsin \frac{D}{\sqrt{16H^2 + D^2}} \right)$	$D < 2H$
Пластиноччатый в грунте		$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{4 \sqrt{\pi F}} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \sqrt{\frac{F}{4\pi H^2 + F}} \right)$	F — площадь пластины, м ² $H > \sqrt{\frac{F}{\pi}}$

Примечания: 1. В формулах ρ — удельное сопротивление грунта, Ом·м; все размеры подставляются в метрах; при этом R выражается в омах.

2. Если в качестве заземлителей применяются отрезки угловой стали, погруженные в грунт вертикально, формулы для сопротивлений те же, что и для трубчатых заземлителей. При этом в формулы вместо диаметра трубы (стержня) должен проставляться эквивалентный диаметр угловой стали, равный $0,95b$, где b — ширина сторон уголка.

$$\text{Формула } R_m = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{0,01d},$$

где ρ — удельное сопротивление грунта, Ом·м;
 l — длина трубы, м;
 d — диаметр трубы, см

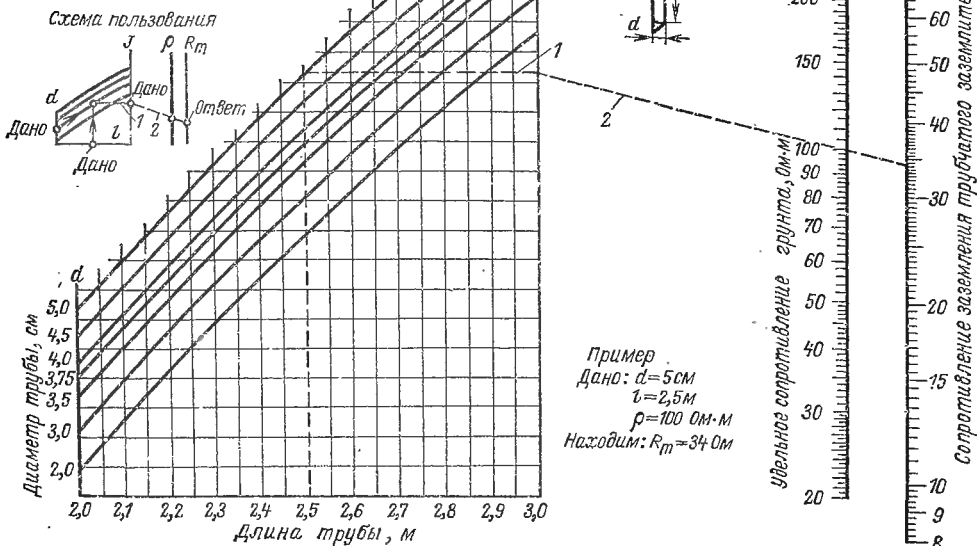


Рис. 8-5. Номограмма для определения сопротивления заземления трубчатого заземлителя.

Таблица 8-7

Коэффициенты использования $\eta_{\text{ст}}$ вертикальных электродов группового заземлителя без учета влияния полосы связи

Число заземлителей	Отношение расстояний между электродами к их длине					
	1	2	3	1	2	3
	Электроды размещены в ряд			Электроды размещены по контуру		
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,80
10	0,59	0,74	0,81	0,56	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40	—	—	—	0,41	0,58	0,66
60	—	—	—	0,39	0,55	0,64
100	—	—	—	0,36	0,52	0,62

7. Определяют сопротивление всех стержней $R_{\text{ст}}$ по формуле

$$R_{\text{ст}} = \frac{R_{\Pi} R_{\text{н}}}{R_{\Pi} - R_{\text{н}}},$$

где R_{Π} — сопротивление полосы, определяемое по формуле табл. 8-6 с учетом коэффициента использования η_{Π} по табл. 8-8.

8. Учитывая коэффициент использования вертикальных заземлителей, окончательно определяют их число по формуле

$$n = \frac{R_{\text{од}}}{\eta_{\text{ст}} R_{\text{ст}}}.$$

9. Повторно определяют сопротивление заземлителя, а также находят коэффициент

Таблица 8-8

Коэффициенты использования η_{Π} горизонтального полосового электрода, соединяющего вертикальные электроды группового заземлителя

Отношение расстояний между вертикальными электродами к их длине	Число вертикальных электродов							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Вертикальные электроды размещены в ряд								
1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42	—	—	—
2	0,94	0,80	0,84	0,75	0,56	—	—	—
3	0,96	0,92	0,88	0,82	0,68	—	—	—
Вертикальные электроды размещены по контуру								
1	—	0,45	0,40	0,34	0,27	0,22	0,20	0,19
2	—	0,55	0,48	0,40	0,32	0,29	0,27	0,23
3	—	0,70	0,64	0,56	0,45	0,39	0,36	0,33

Таблица 8-9

Коэффициенты напряжения прикосновения и шага

Исполнение заземления	Эскиз заземления	Расстояние л между па- раллельны- ми полосами, м	Число внут- ренних па- раллельных полос в кон- туре	Коэффициент напря- жения	
				прикосно- вания α_1	шага β_1
Единичный протяженный заземлитель ($l > 20$ м; $H \approx$ $\approx 0,5$ м)		—	—	1,0	0,3
Ряд стержней соединен- ных полосой ($H \approx 0,8$ м; $l >$ > 25 м)		—	—	1,0	0,6
Контур из полос с внут- ренними параллельными по- лосами ($H \approx 0,5$ м)		2,5	2	0,30	0,15
		5	2	0,35	0,15
		10	2	0,40	0,15
		15	2	0,45	0,15
		2,5	5	0,15	0,15
		5	5	0,20	0,15
		10	5	0,30	0,15
		15	5	0,35	0,15
		2,5	10	0,10	0,15
		5	10	0,15	0,15
Контур из стержней и полос с внутренними парал- лельными полосами ($H \approx$ $\approx 0,5$ м)		10	10	0,25	0,15
		15	10	0,30	0,15
		2,5	5	0,10	0,15
		2,5	10	0,75	0,15
		5	5	0,15	0,15
		5	10	0,10	0,15
		10	5	0,25	0,15
		10	10	0,20	0,15
		15	5	0,35	0,15
		15	10	0,25	0,15

ты напряжений прикосновения и шага по данным табл. 8-9.

Заземляющие устройства в сетях с большими токами замыкания на землю проверяют на термическую стойкость. Заземлители проверяют по выражению:

$$S > 0,0127 \cdot 10^{-5} \sqrt{\rho t},$$

где S — поверхность соприкосновения заземлителя с грунтом, м^2 ; ρ — удельное сопротивление грунта в наиболее сухой период, $\text{Ом} \cdot \text{м}$; t — длительность замыкания на землю, с.

Заземляющие проводники проверяют на термическую стойкость по выражению

$$S \geq \sqrt{\frac{I_s^2 t}{a \theta}},$$

где a — постоянный множитель (для стали 21, алюминия 74, для меди 172); θ — допускаемая температура кратковременного нагрева (для стали 400°C).

18*

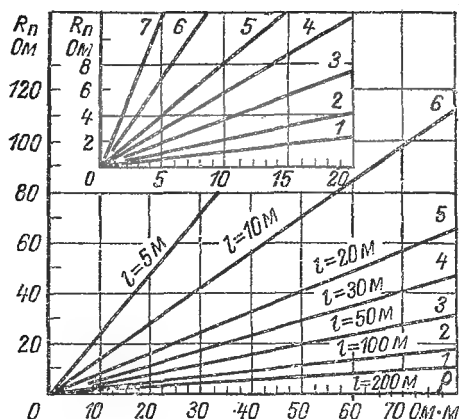


Рис. 8-6. Сопротивление растеканию полосового заземлителя 40×40 мм на глубине 0,7 м.

l — длина заземлителя, м; R_{Π} — сопротивление растеканию протяженного заземлителя, Ом .

Заземлители

Для заземления электроустановок должны быть в первую очередь использованы *естественные заземлители*. Если эти заземлители имеют сопротивление растеканию, удовлетворяющее требованиям ПУЭ, то устройство искусственных заземлителей не требуется.

В качестве *естественных заземлителей* рекомендуется использовать:

1) проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы, за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих и взрывчатых газов и смесей;

2) обсадные трубы артезианских скважин;

3) металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, имеющие соприкосновение с землей;

4) металлические шпунты гидротехнических сооружений и т. п.;

5) свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле, при количестве их не менее двух;

6) заземлители опор линий электропередачи, соединенные с заземляющим устройством электроустановки при помощи грозозащитного троса линий, если трос не изолирован от опор линии.

7) нулевые рабочие провода при наличии не менее двух отходящих воздушных линий электропередачи напряжением до 1000 В с повторными заземлителями нулевого рабочего провода при сечении его не менее указанных в [8-1].

Заземлители должны быть связаны с магистралью заземления не менее чем двумя проводниками, присоединенными к заземлителю в разных местах. Это требование не относится к повторному заземлению нулевого провода и металлическим оболочкам кабелей.

Для искусственных заземлителей следует применять сталь. Наименьшие размеры стальных заземлителей приведены в табл. 8-3 (последний столбец). Заземлители не должны иметь окраски.

В случае опасности усиленной коррозии заземлителей должно выполняться одно из следующих мероприятий:

1. Увеличение сечения заземлителей.
2. Применение оцинкованных или омедненных заземлителей.
3. Электрическая защита.

Заземляющие и нулевые защитные проводники

В качестве нулевых защитных проводников должны быть в первую очередь использованы нулевые рабочие проводники.

В качестве заземляющих и нулевых защитных проводников могут быть использованы:

1) специально предусмотренные для этой цели проводники;

2) металлические конструкции зданий (фермы, колонны и т. п.);

3) металлические конструкции производственного назначения (подкрановые пути, каркасы распределительных устройств, галереи, площадки и шахты лифтов, подъемников и элеваторов, обрамления каналов и т. п.);

4) стальные трубы электропроводов;

5) алюминиевые оболочки кабелей;

6) металлические кожухи шинопроводов, металлические корпуса и лотки электроустановок;

7) металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений, кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ и смесей, канализации и центрального отопления.

Магистраль заземления и зануления и ответвления от них в закрытых помещениях и в наружных установках должны быть доступны для осмотра и иметь сечения не менее приведенных в табл. 8-3. Поперечное сечение нулевых проводников должно также отвечать требованию, чтобы при замыкании на корпус или на нулевой проводник возникал ток короткого замыкания, превышающий не менее чем в 3 раза номинальный ток плавкой вставки ближайшего предохранителя или номинальный ток расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратную зависимость от тока характеристики.

При защите сетей автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель (отсечку), нулевой защитный проводник должен быть выбран таким образом, чтобы в цепи фаза — нуль был обеспечен ток короткого замыкания, равный уставке тока мгновенного срабатывания, умноженной на коэффициент, учитывающий разброс (по заводским данным), и на коэффициент запаса 1,1. При отсутствии заводских данных кратность тока короткого замыкания относительно уставки следует принимать равной 1,4 для автоматов с номинальным током до 100 А и 1,25, для автоматов с номинальным током более 125 А. Полная проводимость нулевых защитных проводников должна быть не менее 0,5 проводимости фазного провода.

В сетях до 1000 В с глухозаземленной нейтралью для проверки обеспечения отключения замыканий между фазным и нулевым проводами ток замыкания определяется по приближенной формуле

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{ф}}}{z_{\text{п}} + z_{\text{т}}/3},$$

где $U_{\text{ф}}$ — фазное напряжение сети; $z_{\text{п}} = \sqrt{r_{\text{п}}^2 + x_{\text{п}}^2}$ — полное сопротивление петли «фазный провод — нулевой провод» линии; $z_{\text{т}}/3$ — сопротивление обмотки трансформатора (согласно паспортным данным или из опыта короткого замыкания).

Соединения заземляющих и нулевых защитных проводников между собой долж-

ны выполняться, как правило, посредством сварки. В помещениях и наружных установках без агрессивных сред допускается в местах, доступных для осмотра и ремонта, выполнять болтовые соединения.

Присоединение заземляющих и нулевых защитных проводников к частям оборудования, подлежащим заземлению или занулению, должно быть выполнено сваркой или болтовым соединением. Присоединение должно быть доступно для осмотра.

Заземление и зануление переносных электроприемников

Питание переносных электроприемников следует выполнять от сети напряжением не выше 380 В.

В зависимости от категории опасности помещения переносные электроприемники могут питаться либо непосредственно от сети, либо через *разделяющие* или *понижающие трансформаторы*.

Металлические корпуса переносных электроприемников переменным напряжением выше 42 В и постоянным 110 В в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках должны быть заземлены или занулены, за исключением электроприемников с двойной изоляцией или питающихся от разделительных трансформаторов.

Заземление или зануление переносных электроприемников должно осуществляться специальной жилой, расположенной в одной оболочке с фазными жилами переносного провода и присоединяемой к корпусу электроприемника и к специальному контакту вилки соединителя. Сечение этой жилы должно быть равным сечению фазных проводников.

Передвижные электростанции и трансформаторные подстанции должны иметь заземляющие (зануляющие) устройства, выполненные как для стационарных установок. Электроприемники передвижных установок, получающие питание от этих электростанций или подстанций, должны иметь заземляющие или зануляющие устройства, аналогичные устройствам электроприемников, получающих питание от стационарных установок.

Заземление передвижных электростанций и передвижных механизмов не требуется в следующих случаях:

1. Если передвижные механизмы имеют собственную электростанцию, расположенную непосредственно на механизме на общей металлической раме и не питающую другие установки.

2. Если механизмы (при числе их не более двух) питаются от специально предназначенной для них передвижной электростанции, не питающей другие установки, и находятся на расстоянии не более 50 м от электростанции, а корпуса электростанции и механизмов имеют металлическую связь при помощи соединительных проводников.

Защитное отключение

Защитным отключением называется система защиты, обеспечивающая автоматическое отключение всех фаз или полюсов аварийного участка сети с напряжением до 1000 В с полным временем отключения с момента возникновения однофазного замыкания не более 0,2 с.

Отключение электроустановок при замыканиях на корпус (защитное отключение) может обеспечиваться специальными устройствами, автоматически снимающими напряжение с электроустановки, которые необходимо применять в следующих случаях:

а) в электроустановках с изолированной нейтралью, к которым предъявляются повышенные требования в отношении безопасности, в дополнение к устройству заземлений (торфяные разработки, угольные шахты и т. п.);

б) в электроустановках с глухозаземленной нейтралью напряжением до 1000 В взамен присоединения корпусов оборудования к заземленной нейтрали, если выполнение этого присоединения встречает затруднения; при этом защищаемая электроустановка должна иметь заземляющее устройство, удовлетворяющее требованиям к электроустановкам с изолированной нейтралью;

в) в передвижных установках, если заземление их не может быть выполнено в соответствии с требованиями правил.

В зависимости от входной величины устройства защитного отключения подразделяются на устройства, реагирующие:

1) на напряжение корпуса относительно земли;

2) на ток замыкания на землю;

3) на напряжение нулевой последовательности;

4) на напряжение фазы относительно земли;

5) на ток нулевой последовательности.

1. *Схема с реакцией на напряжение корпуса относительно земли.* В этой схеме датчиком служит реле напряжения *RH*, включенное между корпусом электрооборудования и вспомогательным заземлителем (рис. 8-7). Она может быть использована в сетях с изолированной и глухозаземленной нейтралью любого напряжения. Защита срабатывает при замыкании на корпус.

При замыкании одной фазы в электроприемнике на корпус и при неотключении электроприемника защитой от однофазных коротких замыканий (для сети с глухозаземленной нейтралью) напряжение корпуса электроприемника относительно земли окажется выше напряжения на дополнительном заземлителе, тогда реле защиты сработает, замкнет цепь отключающей катушки *ОК* выключателя *B*, после чего произойдет отключение от сети электроприемника с поврежденной изоляцией.

В сети напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью реле *RH* включается между корпусом и нулевым проводом

(рис. 8-8). При срабатывании реле его контакты замыкают цепь накоротко, отчего перегорает плавкая вставка предохранителя и с поврежденного электрического аппарата или машины снимается напряжение. Досто-

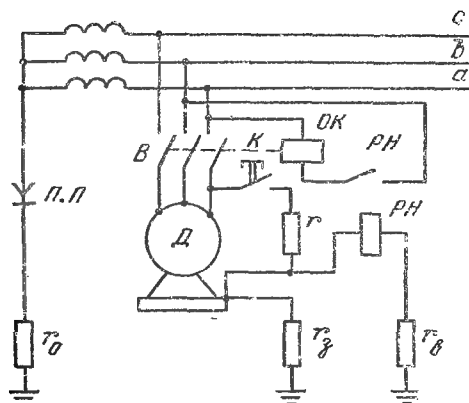


Рис. 8-7. Схема защитного отключения с реакцией на напряжение корпуса относительно земли.

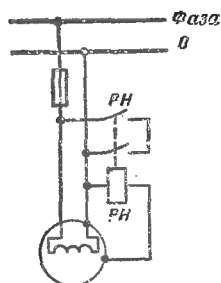


Рис. 8-8. Включение реле напряжения между корпусом электродвигателя и нулевым проводом.

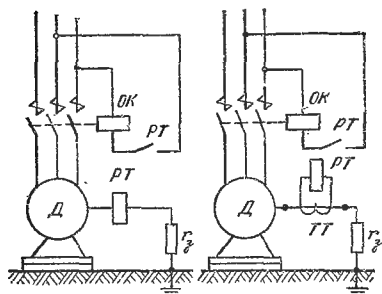


Рис. 8-9. Принципиальная схема защитного отключения с реакцией на ток замыкания на землю.

инством этой схемы является то, что сечение провода, соединяющего корпус электродвигателя через обмотку реле РН с нулевым проводом сети, может быть небольшим, а ток короткого замыкания после срабатывания реле будет достаточно велик для перегорания плавкой вставки предохранителя.

2. Схема защитного отключения с реакцией на ток замыкания на землю. Токовое реле РТ включено в рассечку заземляющего провода (рис. 8-9). При прохождении тока на землю, превышающего некоторое предельно допустимое значение, произойдет срабатывание реле, а его контакты замкнут цепь отключающей катушки ОК выключателя (автомат, контактор). Эта схема обеспечивает отключение при глухом замыкании на землю (корпус) в сетях как с изолированной, так и с заземленной нейтралью при любом номинальном напряжении.

3. Схема с реакцией на напряжение фазы относительно земли. Реле минимального напряжения 1РЗ, 2РЗ и 3РЗ (датчики) включены между фазами и землей (рис. 8-10). При исправной изоляции всех фаз ($U_a = U_b = U_c \approx 0$) реле находится под одинаковым фазным напряжением. В случае повреждения изоляции или значительного уменьшения сопротивления изоляции какой-либо фазы (например, в случае прикосновения человека к проводу фазы) возникает дополнительная проводимость g' и вследствие нарушения симметрии фазных напряжений напряжение данной фазы

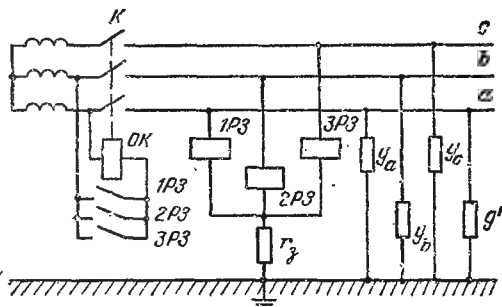


Рис. 8-10. Принципиальная схема защитного отключения с реакцией на несимметрию напряжения фаз относительно земли.

уменьшается. Если напряжение данной (поврежденной) фазы уменьшается настолько, что становится ниже уставки напряжения срабатывания, то реле сработает и его контакты замкнут цепь отключающей катушки ОК контактора К, который отключит данную сеть.

4. Схема с реакцией на напряжение нулевой последовательности. Защитное отключение по этой схеме использует в качестве датчика фильтр напряжения нулевой последовательности (например, емкостный) с включенным в него реле максимального напряжения РЗ (рис. 8-11). При равенстве проводимостей (сопротивлений) изоляции проводов относительно земли напряжение нулевой последовательности, приложенное к обмотке реле РЗ, равно нулю. При повреждении изоляции одной из фаз и увеличении ее проводимости (а также в случае увеличения проводимости при прикосновении человека к токоведущей части фазы)

симметрия фазных напряжений нарушается и появляется напряжение тем больше, чем больше проводимость изоляции. В результате реле срабатывает и отключает установку.

5. *Схема с реакцией на ток нулевой последовательности.* При защитном отключении по этой схеме в качестве датчика используется трансформатор тока нулевой

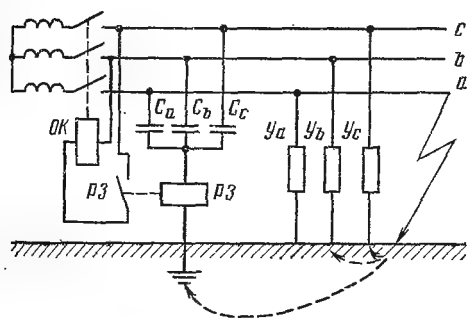


Рис. 8-11. Принципиальная схема защитного отключения с реакцией на напряжение нулевой последовательности.

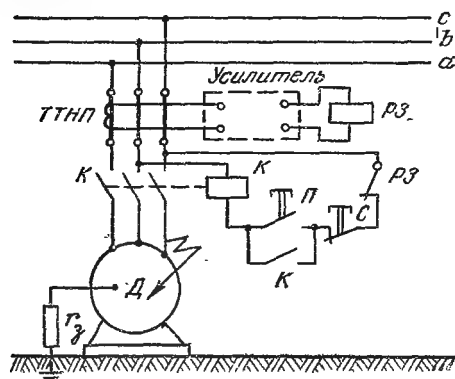


Рис. 8-12. Принципиальная схема защитного отключения с реакцией на ток нулевой последовательности.

последовательности *ТТНП* (рис. 8-12). Магнитопровод *ТТНП* охватывает все три провода (например, жилы кабеля) сети. К его вторичной обмотке подключается через усилитель обмотка реле защиты *РЗ*. При отсутствии в сети замыкания на землю и при равных проводимостях изоляции фаз относительно земли ток нулевой последовательности во вторичной цепи *ТТНП* равен нулю. При замыкании фазы на землю или при прикосновении человека к токоведущей части одной фазы нарушается симметрия токов и возникает дополнительная проводимость. Через вторичную обмотку и реле проходит усиленный ток нулевой последовательности

$$I_p = 3I_0/K_T,$$

где $3I_0$ — ток нулевой последовательности;

K_T — коэффициент трансформации трансформатора тока. Этот ток вызывает срабатывание реле *РЗ*, контакты которого замыкают цепь питания рабочей катушки контактора *К*, который отключается. Защитное отключение по схеме тока нулевой последовательности может применяться в любых трехфазных сетях независимо от режима нейтрали.

Другими защитными мерами в электроустановках от опасных напряжений являются *двойная изоляция, разделительные трансформаторы, изолирующие площадки и защитные средства* (табл. 8-10).

Таблица 8-10

Типы и номинальные напряжения изолирующих защитных средств

Наименование	Тип	Номинальное напряжение установки, кВ
Оперативная штанга для внутренних установок	ШИ-10	10
То же	ШО-10У4	10
» »	ШО-35У4	35
Оперативная штанга для установок и снятия разрядников	ШР-110У4	110
Штанга оперативная универсальная	ШОУ-15	15
То же	ШОУ-35	35
» »	ШОУ-110	110
» »	ШОУ-220	220
Штанга универсальная измерительная	ШИ-35У4	35
То же	ШИ-110У4	110
» »	ШИ-220У4	220
Клеи изолирующие для замены предохранителей	—	6—35
Клеи электроизмерительные для измерения тока	Ц-90	до 10
То же для измерения тока и напряжения	Ц-91	0,3—0,66
То же для измерения мощности	Д-90	0,22—0,38
Указатель высокого напряжения	УВН-10	2—10
То же	УВН-80М	10
» »	УВН-90	35—110
То же низкого напряжения	УНН-1	0,127—0,5
»	УНН-10	0,127—0,5

8-4. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

Источники электростатических зарядов на производстве

Электростатические заряды могут возникать: при соприкосновении или трении твердых материалов; при размельчении или пересыпании однородных и неоднородных материалов — диэлектриков; при разбрызгивании диэлектрических жидкостей; при транспортировании сыпучих веществ и жидкостей по трубам; при фильтрации жидкостей и др.

Практически статическая электризация проявляется при работе ременных передач

и ленточных транспортеров; при перематывании и обработке тканей, бумаги, полимерных пленок; при размоле и просеивании сыпучих материалов; при движении нефтепродуктов по трубопроводам с некоторой скоростью; в процессе слива, налива и перекачивания нефтепродуктов из одной емкости в другую и т. п.

Потенциалы на приводном ремне могут достигать значений 40—50 кВ, на тканях — до 15 кВ, на бумаге до 20 кВ, что существенно зависит от скорости их движения и влажности воздуха. При влажности воздуха 85% и выше электростатическая электризация не наблюдается.

Движение диэлектрических жидкостей (нефтепродуктов) по трубам в некоторых условиях может сопровождаться интенсивной электризацией, которая создает опасность воспламенения их паров во время возникновения разрядов. Генерация электростатических зарядов возможна при заполнении резервуаров диэлектрическими жидкостями в результате разбрызгивания при заполнении резервуара свободно падающей струей.

Электрические заряды на частях производственного оборудования могут взаимно нейтрализоваться благодаря некоторой электрической проводимости воздуха (особенно влажного). В ряде случаев при малой влажности воздуха, когда на частях производственного оборудования образуются значительные электростатические заряды, может произойти искровой разряд системы. При этом энергии искры может оказаться достаточно для воспламенения горючей или взрывоопасной смеси.

Электростатическая искробезопасность (ЭСИБ) должна обеспечиваться устранением разрядов статического электричества, способных стать источником зажигания огнеопасных веществ. Для обеспечения ЭСИБ необходимо выполнять требования ГОСТ 12.1.018-79 «Статическое электричество. Искробезопасность», а также соответствующей нормативно-технической документации.

В ряде случаев возникающая статическая электризация тела человека и затем последующие разряды с человека на землю или заземленное производственное оборудование, а также электрический разряд с незаземленного оборудования через тело человека на землю могут вызывать нежелательные болевые и нервные ощущения и быть причиной непроизвольного резкого движения человека, в результате которого человек может получить ту или иную механическую травму (падение, ушибы, ранение).

Устранение опасности возникновения зарядов

Меры подавления электростатических зарядов имеют целью предупредить опасность пожара или взрыва вследствие воспламенения горючих и взрывоопасных смесей от искр электростатических разрядов, а также защитить обслуживающий производ-

ственный персонал от нежелательного воздействия токов разряда на организм (ощущение укола, судороги, боли). Защитные меры регламентированы [8-7]. Они направлены на предупреждение возникновения и накопления зарядов и создание условий рассеивания зарядов.

К основным мерам защиты относятся: заземление металлических объектов оборудования и коммуникаций; увеличение проводимости веществ и материалов, генерирующих заряды; снижение интенсивности возникновения зарядов; нейтрализации зарядов; отвод электростатических зарядов, образующихся на людях.

Заземление оборудования устраняет формирование электрических зарядов и разряд их с проводящих элементов оборудования на землю. Заземлять следует не только те части оборудования, которые участвуют в генерировании зарядов, но и все другие изолированные от земли проводники, которые могут зарядиться вследствие электростатической индукции. Заземлять следует смесители, вальцы, каландры, компрессоры, насосы, фильтры, сушилки, сублиматоры, абсорберы, реакторы, мельницы, транспортеры, сливно-наливные устройства и т. п. Сопротивление заземляющего устройства (учитывая малые токи утечки) допускается до 100 Ом. Заземление для защиты от электростатических разрядов рекомендуется объединять с заземлением электроустановок и молниезащиты.

Все соединения в заземляющем устройстве, как правило, должны выполняться сваркой. Каждую систему аппаратов и трубопроводов в пределах цеха следует заземлять не менее чем в двух местах. То же относится к резервуарам вместимостью более 50 м³. Обязательному заземлению подлежат наливные стойки эстакад, рельсы в пределах сливного фронта, а также цистерны или наливные суда, находящиеся под наливом (сливом) сжиженных горючих газов и пожароопасных жидкостей.

Резиновые шланги с металлическими наконечниками для налива жидкостей в цистерны, наливные суда, бочки и т. п. следует заземлять медной проволокой, навитой снаружи или внутри шланга, с припайкой одного ее конца к металлическим частям трубопровода, а другого к наконечнику шланга.

Для выравнивания потенциалов и предотвращения искрения все параллельно расположенные трубопроводы в цехах и каналах на расстоянии до 10 см друг от друга соединяют перемычками через каждые 20—25 м.

Если заземлением оборудования не удается предотвратить накопление зарядов, то рекомендуется принять меры по уменьшению объемных и поверхностных сопротивлений обрабатываемых материалов, генерирующих заряды. Это достигается повышением относительной влажности окружающего воздуха сверх 65% и самого материала, химической обработкой, применением

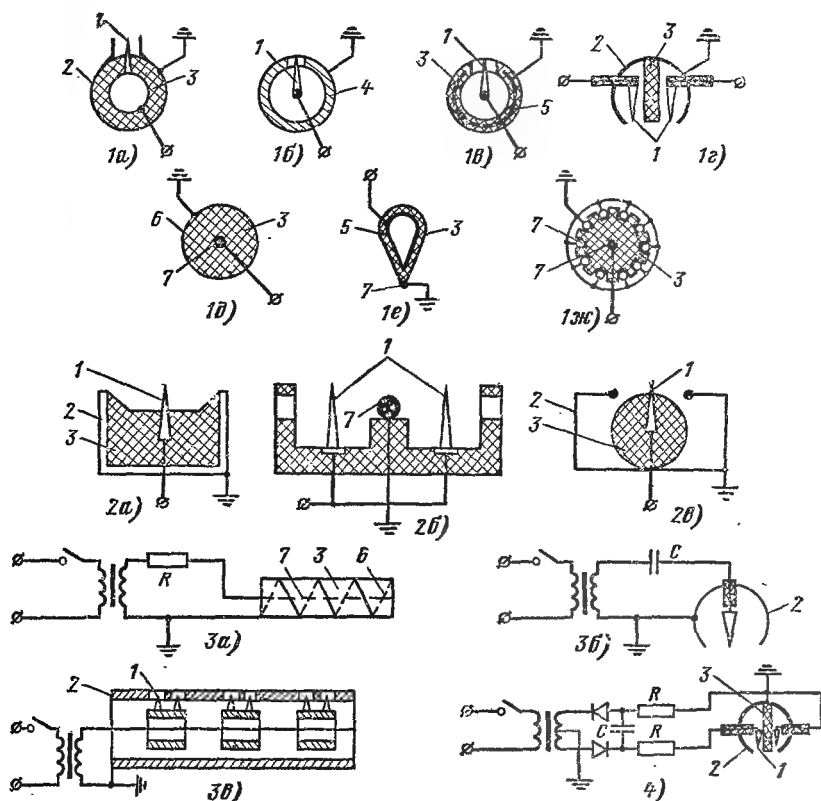


Рис. 8-13. Конструкции и схемы включения высоковольтных нейтрализаторов.

Конструкции: 1а—1ж — трубчатые; 2а—2в — желобковые; 3а—3в — схемы включения на переменном токе промышленной частоты (3а — ограничение тока короткого замыкания активным сопротивлением; 3б и 3в — емкостным сопротивлением); 4 — на постоянном токе; 1 — игла-электрод; 2 — металлическая оболочка-электрод; 3 — диэлектрический стержень; 4 — металлическая труба-электрод; 5 — металлический вкладыш-электрод; 6 — проволока-электрод; 7 — металлический стержень-электрод.

антистатических присадок, нанесением электропроводящих пленок.

Для увеличения проводимости диэлектриков в них вводят растворимые присадки. В жидкие диэлектрики вводят до 0,01% солей высших карбоновых, нефтяных и синтетических жирных кислот, отчего значительно повышается их удельная объемная проводимость.

Снижение интенсивности возникновения электростатических зарядов достигается соответствующей оптимальной скоростью движения веществ, исключением разбрызгивания, распыления, подсосом поверхностей трения, очисткой горючих жидкостей и газов от примесей. Безопасные скорости транспортировки жидких и пылевидных веществ в зависимости от удельного объемного электрического сопротивления нормируются [8-7].

Налив жидкостей в резервуары, цистерны и тару свободно падающей струей не допускается. Сливную трубу следует удлинить до дна приемного сосуда и направить струю жидкости вдоль стенки. При первоначальном заполнении резервуаров жид-

кость подается с пониженной скоростью около 0,5—0,7 м/с.

Нейтрализация зарядов может осуществляться путем ионизации воздуха, разделяющего заряженные тела. Ионизаторы воздуха могут применяться индукционные, высоковольтные, радиоизотопные и комбинированные.

Индукционные ионизаторы вследствие индукции создают вблизи заряженного тела электрическое поле большой напряженности; при этом вблизи электродов-ионизаторов образуется коронный разряд, ионизирующий воздух. Образовавшиеся ионы воздуха притягиваются к поверхности заряженного тела и нейтрализуют его заряд. Индукционные ионизаторы выполняют в виде несущих стержней, на которых укреплены иглообразные, щеточные или проволоочные электроды.

На электроды высоковольтных ионизаторов подается переменное напряжение промышленной или высокой частоты 4—15 кВ либо выпрямленное напряжение. Конструкции и схемы включения высоковольтных нейтрализаторов показаны на рис. 8-13.

Радиоизотопные нейтрализаторы применяют во взрывоопасных производствах химической промышленности в установках производства лавсановой и полиэтиленовой пленки, бумаги, тканей. Они просты в конструктивном отношении и не требуют источников электропитания. Наибольшей ионизирующей способностью обладают нейтрализаторы с α -излучением. Глубина проникновения α -частиц в воздухе около 2,5–3,5 см, что делает безопасным применение это-

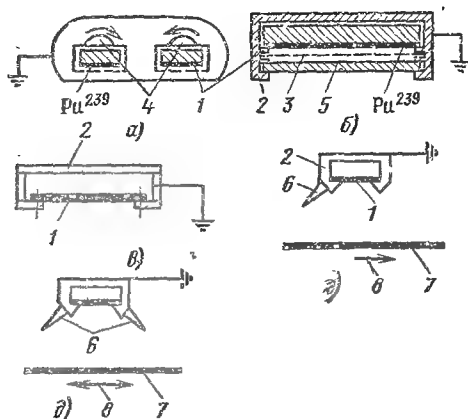


Рис. 8-14. Радиоактивные и радиоактивно-индукционные нейтрализаторы.

а, б — радиоактивные с α -излучающими источниками; в — с β -излучающими источниками; г, д — радиоактивно-индукционный; 1 — активный преобразователь; 2 — металлический контейнер; 3 — металлическая сетка; 4 — рукоятка; 5 — экран; 6 — игла; 7 — направление движения материала.

го вида излучения для обслуживающего персонала.

На рис. 8-14 изображены схематически радиоактивные нейтрализаторы на основе плутония Pu^{239} . Нейтрализатор состоит из металлического контейнера, в котором расположены держатели источников радиации, которые могут поворачиваться на 180° . В рабочем положении активная поверхность источника излучения обращена к наэлектризованному объекту через окно в контейнере.

В комбинированных нейтрализаторах, например, типа НРИ-3 и НРИ-5 в общем кожухе совмещены радиационный и индукционный нейтраллизаторы.

В аэродинамических нейтрализаторах ионы, полученные в ионизирующей камере, подаются в зону нейтрализации потоком воздуха.

Отвод электростатических зарядов с тела человека осуществляется путем устройства электропроводящих полов, помостов, рабочих площадок, заземления ручек дверей, поручней лестниц, рукояток приборов и аппаратов, а также обеспечением работающих токопроводящей обувью, антистатическими халатами.

8-5. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ И УСТАНОВОК

Классификация производств и помещений по пожарной опасности

При проектировании и строительстве производственных зданий и сооружений следует учитывать категории производств по пожарной и взрывной опасности. Согласно Строительным нормам и правилам (СНиП II-М.2-78) в зависимости от характеристики обращающихся в производстве веществ и их количества производства подразделяются на категории А—Е.

Категория А. Производства взрывопожароопасные, в которых обращаются следующие вещества: горючие газы, нижний предел взрываемости которых 10% и менее к объему воздуха; жидкости с температурой вспышки паров до 28°C включительно при условии, что указанные газы и жидкости могут образовать взрывоопасные смеси в объеме, превышающем 5% объема помещения; вещества, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом.

Категория Б. Производства взрывопожароопасные, в которых обращаются следующие вещества: горючие газы, нижний предел взрываемости которых более 10% к объему воздуха; жидкости с температурой вспышки паров выше 28 до 61°C включительно; жидкости, нагретые в условиях производства до температуры вспышки и выше; горючие пыли или волокна, нижний предел взрываемости которых 65 г/м^3 и менее к объему воздуха, при условии, что указанные газы, жидкости и пыли могут образовать взрывоопасные смеси в объеме, превышающем 5% объема помещения.

Категория В. Производства пожароопасные, в которых обращаются следующие вещества: жидкости с температурой вспышки паров выше 61°C ; горючие пыли или волокна, нижний предел взрываемости которых более 65 г/м^3 к объему воздуха; вещества, способные гореть только при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом; твердые горючие вещества и материалы.

Категория Г. Производства, в которых обращаются негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени; твердые, жидкие и газообразные вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.

Категория Д. Производства, в которых обращаются негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Категория Е. Производства взрывоопасные, в которых обращаются следующие вещества: горючие газы без жидкой фазы и взрывоопасные пыли в таком количестве,

что они могут образовать взрывоопасные смеси в объеме, превышающем 5% объема помещения, и в котором по условиям технологического процесса возможен только взрыв (без последующего горения) при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом.

Склады и наружные установки, в зависимости от обращающихся в них веществ и материалов, подразделяются на те же категории, что и производств.

Категории взрыво-пожароопасности указаны в нормах технологического проектирования или в специальных перечнях производств, которые составляются и утверждаются министерствами.

Согласно ПУЭ пожароопасные помещения подразделяются на следующие классы.

Помещения класса П-I. К ним относятся помещения, в которых применяются или хранятся горючие жидкости с температурой вспышки паров выше 45°C (например, склады минеральных масел, установки по регенерации минеральных масел и т. п.).

Помещения класса П-II. К ним относятся помещения, в которых выделяются горючие пыль или волокна, переходящие во взвешенное состояние. Возникающая при этом опасность ограничена пожаром (но не взрывом) либо в силу физических свойств пыли или волокон (степень измельчения, влажность и т. п., при которых нижний предел взрываемости составляет более 65 г/м^3), либо в силу того, что содержание их в воздухе по условиям эксплуатации не достигает взрывоопасных концентраций (например, деревообделочные цехи, малозапыленные помещения мельниц и элеваторов).

Помещения класса П-III. К ним относятся производственные и складские помещения, содержащие твердые или волокнистые горючие вещества (дерево, ткани и т. п.), причем признаки, перечисленные выше для класса П-II, отсутствуют.

Установки класса П-III. К ним относятся наружные установки, в которых применяются или хранятся горючие жидкости с температурой вспышки паров выше 45°C (например, открытые склады минеральных масел), а также твердые горючие вещества (например, открытые склады угля, торфа, дерева и т. п.).

Определение класса пожароопасных помещений и наружных установок должно производиться технологами совместно с проектировщиками.

Выбор электрооборудования для пожароопасных помещений

Электрооборудование и его элементы по своим физическим свойствам, необходимым для обеспечения надежности их эксплуатации, могут быть:

а) огнестойкими, если они не зажигаются и не обугливаются, а также если они, будучи зажжены, не продолжают самостоятельно гореть или тлеть;

б) дугостойкими, если они не претерпе-

вают изменений при воздействии электрической дуги, возникающей в нормальных условиях работы;

в) влагостойкими, если они не претерпевают изменений при воздействии влаги;

г) химостойкими, если они не претерпевают изменений при воздействии химических реагентов.

Чтобы избежать недопустимого перегрева проводников и обмоток, искрения и дугообразования в машинах и аппаратах и других явлений, могущих быть причиной пожара или взрыва, электрооборудование пожаро- и взрывоопасных электроустановок необходимо выбирать в соответствии с требованиями ПУЭ, а также применять электрические защиты проводов, электрических машин, трансформаторов от перегрузок и в случаях коротких замыканий.

Выбор электрооборудования производится согласно табл. 8-11.

При размещении электрооборудования рекомендуется учитывать условия эксплуатации с целью удаления элементов электрооборудования, представляющих опасность (коммутационных аппаратов, электродвигателей с искрящими контактами и т. д.), от мест скопления горючих материалов.

Неподвижные контактные соединения должны выполняться при помощи пайки, сварки, опрессовки, свинчивания или иным равноценным способом. Винтовые контакты рекомендуется снабдить приспособлением для предотвращения от самоотвинчивания.

Классификация материалов и конструкций по степени возгораемости

Группы возгораемости и характеристики строительных материалов и конструкций приведены в табл. 8-12 (СНиП II-A.5-70).

Здания и сооружения по огнестойкости подразделяются на пять степеней, характеризующих группой возгораемости и пределом огнестойкости основных строительных конструкций согласно табл. 8-13.

Предел огнестойкости строительной конструкции определяется временем в часах от начала испытания конструкции на огнестойкость до возникновения одного из следующих признаков:

а) образование в конструкции сквозных трещин или сквозных отверстий, через которые проходят продукты горения или пламя;

б) повышение температуры на необогреваемой поверхности конструкции в среднем более чем на 140°C или в любой точке этой поверхности более чем на 180°C в сравнении с температурой конструкции до испытания или более 220°C независимо от температуры конструкции до испытания;

в) потеря конструкцией несущей способности (обрушение).

Требуемая степень огнестойкости зданий и сооружений определяется (СНиП II-M.2-72) в зависимости от категории пожарной опасности производства, площади и этажности здания согласно табл. 8-14.

Выбор электрооборудования для пожароопасных помещений и установок

Наименование оборудования		Класс помещения			
		П-I	П-II	П-IIа	П-III
Электрические машины с частями как искрящими, так и не искрящими по условиям работы	Стационарные	1. Брызгозащищенное 2. Закрытое 3. Закрытое обдуваемое. Искрящие части машин (контактные кольца) должны быть заключены в колпаки закрытого исполнения	1. Закрытое 2. Закрытое обдуваемое или продуваемое 3. Продуваемое с замкнутым циклом охлаждения, а также продуваемое с подводом охлаждающего воздуха извне и выбросом отработанного воздуха в помещение. Искрящие части (контактные кольца) должны быть заключены в пыленепроницаемые кожухи	1. Закрытое Искрящие части машин (контактные кольца) должны быть заключены в защитные колпаки	1. Закрытое 2. Закрытое обдуваемое. Искрящие части машины (контактные кольца) должны быть заключены в колпаки закрытого исполнения
	Передвижные	Электрические машины — закрытое или закрытое обдуваемое Электрифицированный инструмент — закрытое исполнение			
Аппараты и приборы, искрящие по условиям работы	Стационарные	1. Маслонаполненное 2. Пыленепроницаемое 3. Открытое и защищенное при установке в шкафах закрытого (уплотненного) исполнения	1. Пыленепроницаемое 2. Открытое и защищенное при установке в шкафах закрытого (уплотненного) исполнения	1. Закрытое 2. Маслонаполненное 3. Открытое и защищенное при установке в шкафах защищенного исполнения	1. Закрытое 2. Открытое и защищенное при установке в шкафах закрытого (уплотненного) исполнения
Аппараты и приборы, не искрящие по условиям работы	Стационарные	1. Закрытое 2. Открытое и защищенное при установке в шкафах закрытого исполнения	1. Закрытое 2. Открытое или защищенное при установке в шкафах закрытого исполнения	1. Закрытое 2. Открытое и защищенное при установке в шкафах защищенного исполнения	1. Закрытое 2. Открытое и защищенное при установке в шкафах закрытого исполнения
	Передвижные	Аппараты и приборы с частями, искрящими по условиям работы в пыленепроницаемом исполнении; аппараты и приборы без искрящих частей по условиям работы — в закрытом исполнении. Применения электронагревательных приборов рекомендуется избегать. В складских помещениях электронагревательные приборы запрещены			

Электрокраны (исполнение электроподъемных аппаратов и приборов кранов, тельферов и т. п.)		1. Пыленепроницаемое 2. Закрытое 3. Открытое или защищенное при установке в закрытых (уплотненных) шкафах Токопровод кранов должен быть осуществлен шланговым кабелем	1. Пыленепроницаемое 2. Закрытое 3. Открытое или защищенное при установке в закрытых (уплотненных) шкафах Допускаются троллеи. Они не должны быть расположены над местами скопления материалов, могущих воспламениться от упавшей раскаленной частицы троллея	1. Защищенное 2. С масляным наполнением при условии принятия мер против выплескивания масла при толчках Допускаются троллеи на таких же условиях, что и для П-II	1. Пыленепроницаемое 2. Закрытое 3. Открытое или защищенное при установке в закрытых (уплотненных) шкафах Допускаются троллеи на таких же условиях, что и для П-II
Распределительные устройства			Сооружение РУ выше 1000 В не рекомендуется		
Электрические светильники	Стационарные	1. Закрытое (уплотненное) 1. Закрытое	1. Закрытое 1. Закрытое 2. Пыленепроницаемое 3. Защищенное и открытое исполнение (например, «Универсаль») для производств, имеющих общую вентиляцию и местный отсос отходов	1. В шкафах защищенного исполнения 1. Защищенное и открытое (например, «Универсаль»)	1. Закрытое 1. Закрытое
	Переносное		Закрытое. Стеклопластиковый колпак должен быть защищен сеткой		

Примечания: В пожароопасных помещениях:

1. Как правило, должны применяться защищенные виды электропроводки: а) в трубах с тонкой металлической оболочкой или трубчатыми проводами — в сухих пыльных помещениях, а также в помещениях пыльных, где пыль в присутствии влаги не образует соединений, разрушительно действующих на металлическую оболочку; б) небронированным кабелем с резиновой изоляцией в свинцовой оболочке или поливинилхлоридной изоляцией в свинцовой либо поливинилхлоридной оболочке.

2. Допускается открытая прокладка изолированных проводов на изоляторах; провода должны быть удалены от места скопления горючих материалов и не испытывать по своему местоположению механических воздействий; открытая прокладка проводов по деревянным нештукатуренным стенам и подшивке не допускается.

3. Жилы алюминиевых проводов и кабелей могут соединяться сваркой, пайкой, опрессовкой.

4. Изоляция проводов должна быть на напряжение не ниже 500 В.

5. В качестве переносных проводов должны применяться только шланговые кабели.

6. Соединительные и ответвительные коробки должны быть негорючими для пыли.

7. Допускается применение медных и алюминиевых шинопроводов при следующих условиях: а) неразъемные соединения выполнены сваркой или опрессовкой; б) болтовые соединения должны иметь приспособления против

самоотвертывания. Шинопроводы должны быть защищены кожухами с отверстиями не более 6 мм, а в помещениях П-I и П-II шины должны быть покрыты изоляцией.

8. Допускаются виды прокладок кабельных линий.

9. Устройства для ввода кабелей или проводов в электрические машины, аппараты и приборы должны соответствовать исполнению машин или аппаратов для данного класса помещений.

В пожароопасных наружных установках классов П-III по открытым вставкам трубопроводов с горючими жидкостями допускается электропроводка в стальных трубах и прокладка бронированных кабелей без джутовой оплетки.

Сближение воздушных линий до и выше 1000 В со зданиями и сооружениями, содержащими пожароопасные помещения, а также с пожароопасными наружными установками должно выполняться согласно ПУЭ.

В помещениях кислородных установок применение масляонаполненных аппаратов запрещается.

В помещениях класса П-II для производств, имеющих общую вентиляцию, а также местный отсос отходов и в помещениях класса П-IIa допускается, как исключение, применение магнитных пускателей в защищенном исполнении.

Шитки и выключатели осветительных цепей и т. п. рекомендуется выносить из пожароопасных помещений.

Т а б л и ц а 8-12

Группы возгораемости строительных материалов и конструкций

Группа возгораемости	Характеристика по возгораемости	
	материалов	конструкций
Несгораемые	Под воздействием огня или высокой температуры не воспламеняются, не тлеют и не обугливаются	Выполненные из несгораемых материалов
Трудносгораемые	Под воздействием огня или высокой температуры с трудом воспламеняются, тлеют или обугливаются и продолжают гореть или тлеть только при наличии источника огня (после удаления источника огня горение и тление прекращаются)	Выполненные из трудносгораемых материалов, а также конструкции из сгораемых материалов, защищенные от огня штукатуркой или облицовкой из несгораемых материалов
Сгораемые	Под воздействием огня или высокой температуры воспламеняются или тлеют и продолжают гореть или тлеть после удаления источника огня	Выполненные из сгораемых материалов и не защищенные от огня штукатуркой или облицовкой, или несгораемых материалов

П р и м е ч а н и е. К несгораемым относятся все естественные и искусственные неорганические материалы, применяемые в строительстве, металлы, а также гипсовые или гипсоволокнистые плиты при содержании органической массы до 8% (мас.); минераловатные плиты на синтетической, крахмальной или битумной связке при содержании ее до 8% (мас.).

К трудносгораемым относятся материалы, состоящие из несгораемых и сгораемых компонентов, например асфальтобетон, гипсовые и бетонные материалы, содержащие более 8% (мас.) органического заполнителя; минераловатные плиты на битумном связующем при содержании его от 7 до 15%; глино-соломенные материалы средней плотности не менее 900 кг/м³; войлок, вымоченный в глиняном растворе; древесина, подвергнутая глубокой пропитке антипиренами; цементный фибролит; полимерные материалы (например, пенопласт марок ПСБ-С по ГОСТ 15538-70 и ФРП-1).

К сгораемым относятся все органические материалы, не отвечающие требованиям, предъявляемым к несгораемым или трудносгораемым материалам.

Т а б л и ц а 8-13

Группа возгораемости в минимальные пределы огнестойкости основных строительных конструкций, ч

Степень огнестойкости зданий или сооружений	Основные строительные конструкции					
	Несущие стены, лестничных клеток, колонны	Наружные стены из навесных панелей и наружные факховые стены	Плиты, настилы и другие несущие конструкции междуэтажных и чердачных перекрытий	Плиты, настилы и другие несущие конструкции покрытий	Внутренние несущие стены (перегородки)	Противопожарные стены (брандмауэры)
I	Несгораемые 2,5	Несгораемые 0,5	Несгораемые 1,0	Несгораемые 0,5	Несгораемые 0,5	Несгораемые 2,5
II	Несгораемые 2,0	Несгораемые 0,25	Несгораемые 0,75	Несгораемые 0,25	Трудносгораемые 0,25	Несгораемые 2,5
III	Несгораемые 2,0	Несгораемые 0,25 Трудносгораемые 0,5	Трудносгораемые 0,75	Сгораемые —	Трудносгораемые 0,25	Несгораемые 2,5
IV	Трудносгораемые 0,5	Трудносгораемые 0,25	Трудносгораемые 0,25	Сгораемые —	Трудносгораемые 0,25	Несгораемые 2,5
V	Сгораемые —	Сгораемые —	Сгораемые —	Сгораемые —	Сгораемые —	Несгораемые 2,5

Пожарная профилактика и тушение пожаров

Профилактические противопожарные мероприятия предусматривают:

а) меры пожарной безопасности при

проектировании и строительстве предприятия;

б) меры пожарной безопасности, принимаемые при проведении технологического процесса при эксплуатации производственного оборудования.

Таблица 8-14

Требуемая степень огнестойкости производственных зданий

Категория производства	Допускаемое чис- ло этажей	Степень огнестой- кости	Площадь этажа между противопо- жарными стенами, м ²		
			одноэтажных	многоэтажных	
				два эта- жа	три эта- жа и более
А и Б	6	I	Не ограничивается		
А и Б (за исключением химиче- ских и нефтегазоперерабатывающих производств)	6	II	Не ограничивается		
А (химические и нефтегазопере- рабатывающие производства)	6	II	Не ограни- чивается	5200	3500
Б (химические и нефтегазопере- рабатывающие производства)	6	II	То же	10 400	7800
В	Не ограничивается	I и II	Не ограничивается		
В	3	III	5200	3500	2600
	2	IV	2600	2000	—
	1	V	1200	—	—
Г	Не ограничивается	I и II	Не ограничивается		
	3	III	6500	5200	3500
	2	IV	3500	2600	—
	1	V	1500	—	—
Д	Не ограничивается	I и II	Не ограничивается		
	3	III	7800	6500	3500
	2	IV	3500	2600	—
	2	V	2500	1500	—
Е	6				

Основные строительные конструкции, внут-
ренние стены и перегородки следует про-
ектировать несгораемыми

Список литературы

- 8-1. Правила устройства электроустановок.
ПУЭ-76. Раздел I, гл. 1—8. — М.: Атомиздат —
56 с.
- 8-2. Правила устройства электроустановок.
ПУЭ-76. Раздел V. — М.: Атомиздат, 1977. — 47 с.
- 8-3. Охрана труда в электроустановках/Б. А.
Князевский, Т. П. Марусова, Н. А. Чекалин,
Н. В. Шилунов. — М.: Энергия, 1977. — 320 с.
- 8-4. Правила технической эксплуатации
электроустановок потребителей и правила техни-
ки безопасности при эксплуатации электроуста-
новок потребителей — М.: Энергия, 1973. — 352 с.
- 8-5. Справочная книга по технике безопасно-
сти в энергетике/Под ред. П. А. Долина. — М.:

- Энергия. Кн. 1, 1978. — 656 с., Кн. 2, 1979. — 608 с.
- 8-6. Правила защиты от статического элект-
ричества в производственных химической, нефтех-
мической и нефтедобывающей промышленности. —
М.: Химия, 1973.
- 8-7. Максимов Б. К., Обух А. А. Статическое
электричество в промышленности и защита от
него. — М.: Энергия, 1978. — 78 с.
- 8-8. Строительные нормы и правила. СНиП
II-A.5-70. Глава 5. Противопожарные нормы про-
ектирования зданий и сооружений. — М.: Строй-
издат, 1978. — 15 с.
- 8-9. Строительные нормы и правила. СНиП
II-M.2-72. Глава 2. Производственные здания про-
мышленных предприятий. Нормы проектирова-
ния. — М.: Стройиздат, 1978. — 23 с.

Раздел 9

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

- 9-1. Основные определения и классифи-
кация электроизоляционных материа-
лов 287
- 9-2. Нагревостойкость электроизоляцион-
ных материалов 288
- 9-3. Жидкие и полужидкие диэлектрики 292
- 9-4. Полимерные органические диэлектри-
ки 293
- 9-5. Электроизоляционные бумаги и кар-
тоны 297

- 9-6. Слоистые электроизоляционные пласт-
массы 300
- 9-7. Электроизоляционные составы (ком-
паунды) 304
- 9-8. Электроизоляционные ленточные 308
- 9-9. Электроизоляционные намотанные из-
делия 309
- 9-10. Электроизоляционные материалы на
основе слюды 310
- 9-11. Электрокерамические материалы 315
- Список литературы 315

9-1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электроизоляционными материалами
называют диэлектрические материалы, с по-
мощью которых осуществляется изоляция

частей электрооборудования, находящихся
под разными электрическими потенциа-
лами. По сравнению с проводниковыми мате-
риалами (проводники) электроизоляцион-
ные материалы обладают значительно боль-
шим электрическим сопротивлением. Харак-
терным свойством электроизоляционных ма-
териалов является возможность создания в
них электростатического поля.

Согласно агрегатному состоянию электроизоляционные материалы делятся на газообразные, жидкие и твердые. Особенно большой является группа твердых электроизоляционных материалов (полимерные, пластмассы, керамика и др.).

Согласно химическому составу электроизоляционные материалы делятся на органические и неорганические. Основным элементом в молекулах всех органических электроизоляционных материалов является углерод. В неорганических диэлектриках углерода не содержится. Наибольшей нагревостойкостью обладают неорганические электроизоляционные материалы (слода, керамика и др.).

По расположению частиц, составляющих электроизоляционные материалы, последние делятся на материалы кристаллической и аморфной структуры.

С точки зрения электрического состояния молекул электроизоляционные материалы делят на неполярные и полярные. Неполярные электроизоляционные материалы состоят из электрически нейтральных атомов и молекул, которые до воздействия из них внешнего электрического поля не обладают электрическими моментами. Нейтральные атомы и молекулы приобретают электрические моменты только под действием внешнего электрического поля — в процессе деформационных поляризации. Неполярными электроизоляционными материалами являются: полиэтилен, фторопласт-4, полистирол, парафин и др. Среди неполярных электроизоляционных материалов выделяют группу ионных кристаллических материалов (слода, кварц, отдельные виды керамики и др.), в которых каждая пара ионов составляет неполярную молекулу. Каждый ион находится в колебательном тепловом движении около своего центра равновесия — узла кристаллической решетки.

Полярные электроизоляционные материалы состоят из полярных молекул — постоянных диполей. Последние вследствие асимметрии своего строения обладают начальным электрическим моментом — до воздействия на них электрического поля. При воздействии электрического поля полярные молекулы ориентируются, стремясь расположить свои оси в направлении действующего на них электрического поля. К полярным электроизоляционным материалам относятся: совол, совтол, поливинилхлорид, бакелиты и др. Полярные электроизоляционные материалы обладают повышенными значениями относительной диэлектрической проницаемости, несколько повышенной проводимостью и гигроскопичностью по сравнению с неполярными электроизоляционными материалами.

Многочисленную группу твердых электроизоляционных материалов делят еще на ряд подгрупп в зависимости от их состава, структуры и технологических особенностей

этих материалов. Так, выделяют электрокерамические материалы, полимерные материалы, лаки, компаунды, изоляционные материалы на основе слюды и другие. Основные электрические и физико-механические характеристики жидких и твердых электроизоляционных материалов приводятся в соответствующих таблицах данного раздела справочника.

9-2. НАГРЕВОСТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, трансформаторах и аппаратах, разделяются по их нагревостойкости на семь классов согласно табл. 9-1 и 9-2.

Согласно современному воззрению на наиболее типичными процессами теплового старения электроизоляционных материалов являются:

1) выделение низкомолекулярных летучих веществ, которые образуются в процессе старения;

2) окисление, вызывающее появление хрупкости материала;

3) развитие процесса полимеризации молекул, которая вначале может улучшать электрические характеристики, а затем вызывать снижение эластичности, появление хрупкости материала и разрушение его под воздействием механических усилий;

4) гидролитическая деструкция за счет взаимодействия остаточной влаги с электроизоляционным материалом под действием тепла;

5) химическое разрушение компонентов с образованием химических активных веществ, например хлористого водорода.

Наиболее полную картину теплового старения электроизоляционных материалов дает кривая старения материала, представляющая зависимость определенных свойств материала от температуры его старения (кривая жизни). Согласно стандарту МЭК (публикации 216-1 и 216-2) для определения нагревостойкости того или иного материала вводится характеристика, называемая температурным индексом (ТИ).

Температурный индекс есть число, соответствующее температуре ($^{\circ}\text{C}$), взятой из «кривой жизни», при которой срок службы материала равен 20 000 ч. Этот промежуток времени был выбран, чтобы получить приближенное представление о температуре, которая обычно обеспечивает достаточный срок службы материала при работе его в большинстве типов электрооборудования.

В настоящее время ведутся работы по уточнению «кривых жизни» электроизоляционных материалов, по которым будут определены их температурные индексы (ТИ).

Таблица 9-1

Нагревостойкость электроизоляционных материалов (по ГОСТ 8865-70)

Класс нагревостойкости ¹	Температура ² , °C	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости ³
Y	90	Непропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов ⁴
A	105	Пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов ⁴
E	120	Синтетические органические материалы: пленки, волокнистые материалы, смолы, компаунды, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов ⁴
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов ⁴
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов ⁴
C	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или элементоорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов ⁴

¹ Нагревостойкость — способность электроизоляционного материала выполнять свои функции при воздействии рабочей температуры в течение времени, сравнимого с расчетным сроком нормальной эксплуатации электрооборудования, в котором применяется данный электроизоляционный материал.

² Указанные в таблице температуры являются предельно допустимыми для электроизоляционных материалов при их длительном использовании (в течение ряда лет) в электрических машинах, трансформаторах и аппаратах, работающих в нормальных эксплуатационных условиях. Температуры в наиболее нагретом месте изоляции не должны превышать указанных предельно допустимых температур при работе электрооборудования в номинальном режиме при предусмотренной для этого режима максимальной температуре охлаждающей среды, указанной в соответствующих ГОСТ или ТУ.

³ С электроизоляционными материалами данного класса допускается совместное применение материалов предшествующих классов при условии, что под действием температуры, допускаемой для материалов более высокого класса, электрические и механические свойства комплексной изоляции не должны претерпевать изменений, могущих сделать изоляцию непригодной для длительной работы.

⁴ Другие сочетания материалов, для которых установлена возможность их работы при температуре, соответствующей данному классу.

Таблица 9-2

Ориентировочное распределение электроизоляционных материалов по классам нагревостойкости¹

Класс нагревостойкости	Электроизоляционные материалы ²	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве указанных материалов	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве электрических машин, трансформаторов и аппаратов с использованием указанных материалов
Y	Текстильные материалы на основе хлопка, натурального шелка, регенерированной целлюлозы, ацетилцеллюлозы и полиамидов Целлюлозные электроизоляционные бумаги, картоны и фибра Древесина Пластические массы с органическими наполнителями	Не применяются » » » » Мочевинноформальдегидные смолы	Не применяются » » » » Не требуются
A	Материалы класса Y, если они пропитаны изоляционным составом или погружены в жидкие диэлектрики (масло и др.)	—	Лаки на основе натуральных смол (шеллак, копалы и др.), эфирцеллюлозные лаки, соответствующие данному классу

Продолжение табл. 9-2

Класс нагре- востойкости	Электроизоляционные мате- риалы ²	Связующие, пропитывающие и покровные составы, при- меняемые при производстве указанных материалов	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяе- мые при производстве электр- ических машин, трансформа- торов и аппаратов с использо- ванием указанных материалов
А	Ацетобутилатцеллюлозные, ацетилцеллюлозные, дицетатные пленки Пленкоэлектрокартон на основе ацетилцеллюлозной пленки Лакоткани, лакобумаги и лакочулки на основе хлопчатобумажной пряжи, натурального шелка, регенерированной целлюлозы, ацетатцеллюлозы или полиамидных волокон Изоляция эмалированных проводов Слоистые пластики на основе целлюлозных бумаг и тканей Полиамидные пленки Полиамидные литые смолы Асбестоцемент, пропитанный органическим составом, не вытекающим при 110° С Древеснослойные пластики Термореактивные компаунды на основе акриловых и метакриловых эфиров (без наполнителей)	— Клеящие составы, соответствующие данному классу нагревостойкости Масляные, смоляные, масляно-смоляные лаки Масляно-смоляные лаки, соответствующие данному классу нагревостойкости Термореактивные смолы фенолформальдегидного типа — Битум, каменноугольный пек и др. Фенолформальдегидные смолы —	нагревостойкости; термопластичные компаунды (битумные и др.) с температурой размягчения, обеспечивающей отсутствие вытекания при рабочих температурах только в неподвижных обмотках Нефтяные и синтетические изоляционные жидкости, соответствующие данному классу нагревостойкости Не требуются
Е	Пленки и волокна из полиэтилентерефталата³ Материалы на основе электроизоляционного картона и полиэтилентерефталатной пленки Стеклолакоткани и лакоткани на основе полиэтилентерефталатных волокон Термореактивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые) Термореактивные компаунды на основе акриловых и метакриловых эфиров с неорганическим наполнителем	— Клеящие и пропитывающие составы соответствующей нагревостойкости — — —	Термопластичные компаунды с температурой размягчения, обеспечивающей отсутствие вытекания их при рабочих температурах только в неподвижных обмотках. Составы, применяемые для намотки класса В (см. ниже) Не требуются » »
В	Материалы на основе щепаной слюды, слюдопластов и слюдинитов⁴, в том числе с бумажной или тканевой органической подложкой Стеклоткани и стеклолакочулки Асбестовые волокнистые материалы, в том числе с органическими волокнами Изоляция эмалированных проводов Пластмассы с неорганическим наполнителем Слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов	Битумно-масляные лаки: природные и синтетические смолы, не модифицированные и модифицированные растительными маслами, и лаки на их основе Лаки: битумно-масляно-смоляные, эскапоновые, эпоксидные, полиуретановые, а также на основе алкидных смол, модифицированных маслом Шеллак, бакелитоглифтазовые и эпоксидные лаки, а также синтетический каучук Лаки на основе полиэтилентерефталатных смол и другие синтетические лаки Термореактивные смолы фенолформальдегидного типа, меламиноформальдегидные, фенолофуорольные, эпоксидные и полиэфирные То же	Битумно-масляносмоляные лаки (на туговом масле), лаки на основе природных и синтетических смол, модифицированных растительными маслами, соответствующие данному классу по нагревостойкости То же То же » » Не требуются » »

Продолжение табл. 9-2

Класс нагревостойкости	Электроизоляционные материалы ²	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве указанных материалов	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве электрических машин, трансформаторов и аппаратов с использованием указанных материалов
В	Термореактивные синтетические компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые) с минеральным наполнителем и отвердителем, соответствующими данному классу нагревостойкости Асбестоцемент, пропитанный органическим составом, не вытекающим при 135° С	» » Битум, каменноугольный лек и другие составы с последующей термообработкой	» » » »
Ф	Материалы на основе щепаной слюды, слюдинитов и слюдопластов без подложки или с неорганической подложкой Стекловолоконистая и асбестовая изоляция проводов Стеклоткань и стеклотрубки Слоистые пластики на основе стекловолоконистых и асбестовых материалов Стекловолоконистая и асбестовая изоляция проводов	Соответствующие данному классу нагревостойкости смолы и лаки: модифицированные и немодифицированные алкидные, эпоксидные, полиуретановые, кремнийорганические и др. То же Кремнийорганические, эпоксидные и другие лаки, соответствующие по нагревостойкости	Соответствующие данному классу нагревостойкости смолы и лаки: модифицированные алкидные, эпоксидные, полиуретановые, кремнийорганические и др. Не требуются Соответствующие данному классу по нагревостойкости смолы и лаки: алкидные, эпоксидные, полиуретановые и кремнийорганические
Н	Материалы на основе щепаной слюды без подложки или с неорганической подложкой Стекловолоконистая изоляция проводов Стеклоткань и стеклотрубки Слоистые пластики на основе стекловолоконистых и асбестовых материалов Пластические массы с неорганическим наполнителем Асбестоцемент Кремнийорганические эластомеры без подложек и с неорганическими подложками Асбестовые материалы (пряжа, ткани, бумаги)	Соответствующие данному классу нагревостойкости кремнийорганические и другие лаки и смолы То же » » » » » » Не применяются	Соответствующие данному классу по нагревостойкости кремнийорганические лаки Не требуются » » » » » » Соответствующие данному классу по нагревостойкости кремнийорганические лаки
С	Слюда Стекло бесщелочное и стекловолоконистые материалы Электротехническая керамика Кварц Асбестоцемент непротитанный Шифер электротехнический Материалы на основе щепаной слюды без подложки или со стекловолоконистой подложкой Микалекс Политетрафторэтилен Полнимиды	Не применяются » » » » » » » » » » Неорганические составы и элементорганические смолы с повышенной нагревостойкостью Не применяется » » » » » »	Не требуются » » » » » » » » » » » » » » » » » »

¹ Классификация электроизоляционных материалов, приведенных в таблице, является ориентировочной и будет уточняться по мере накопления опытных данных и показателей эксплуатации.

² Перечисленные материалы являются основными, но они не исчерпывают многообразия электроизоляционных материалов, появляющихся в связи с новыми разработками. Нагревостойкость одного и того же материала может быть различной в зависимости от того, какие функции он выполняет в электрической машине или аппарате.

³ Опыта длительной эксплуатации этих электроизоляционных материалов в электрических машинах и аппаратах не имеется.

9-3. ЖИДКИЕ И ПОЛУЖИДКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица 9-3

Основные характеристики жидких и полужидких электроизоляционных материалов

Характеристики	Трансформаторное масло ³	Минеральное масло для конденсаторов	Негорючие синтетические жидкости		ПЭС-Д (кремний-органическая жидкость)	Касторовое масло	Вазелин конденсаторный ⁷ нефтяной
			Совол	Совтол ² 1 и 2			
Плотность при 20° С, кг/м ³	880—890	900—920	1540—1560	1520—1540	990—1000	950—970	820—840
Цвет	Соломенно-желтый	Соломенно-желтый	Бесцветный	Бесцветный	Бесцветный	Бледно-желтый	Соломенно-желтый
Зольность, %, не более	0,005	0,0015	—	—	—	0,008	0,004
Кислотное число, г KOH на 1 кг масла ⁶ , не более	0,015—0,02	0,010—0,015	0,015	0,01	0,05—0,07	0,03—0,05	0,03—0,04
Температура застывания, °С, не выше	—45	—45	+5	—(25—40)	—60	—(15—18)	Температура каплепадения 37—40° С
Температура вспышки паров, °С, не ниже	+135	+135	+200	+200	+150	+240	—
Температурный коэффициент расширения, °С ⁻¹	0,00063—0,00068	0,00067	0,00065	0,00060	0,0003	—	—
Вязкость при 20° С, 10 ⁻⁶ м ² /с	28—30	35—40	290 ⁴	115	25—28	—	—
Вязкость при 50° С, 10 ⁻⁶ м ² /с	9,0—9,6	9,5—10,5	9 ⁴	3 ⁵ —3,5	—	26—28	28—30 ⁴
Удельное объемное сопротивление при 20° С, Ом·м	10 ¹² —10 ¹³	10 ¹² —10 ¹³	10 ¹² —10 ¹³	10 ¹¹ —10 ¹²	10 ¹⁰ —10 ¹²	10 ¹⁰ —10 ¹¹	10 ¹² —10 ¹³
Относительная диэлектрическая проницаемость при 20° С	2,1—2,4	2,1—2,3	5,0—5,2	4,5—4,8	2,4—2,6	4,5—4,8	3,8—4,0
Тангенс угла диэлектрических потерь при 20° С и 50 Гц	0,001—0,003	При 100°С 0,003—0,005	0,02 ⁴ —0,03	0,005—0,008	0,0002—0,0003	0,008—0,015	0,008—0,002
Электрическая прочность при 20° С и 50 Гц, МВ/м	15—20	20—25	14—16	13—18	18—20	12—16	20—22
Цена за 1 кг	18—25 коп.	22 коп.	96 коп.	1 р. 20 к.	8 руб.	1 р. 90 к.	25 коп.

¹ При 90° С.² Совтол-2 обладает меньшей вязкостью и более низкой температурой замерзания (—40° С).³ Трансформаторное масло выпускается двух модификаций: масло трансформаторное без присадок и масло трансформаторное с присадкой ВТИ-1. Характеристики этих масел укладываются в пределы, приведенные в таблице.⁴ Вязкость совола дана при 40 и 90° С.⁵ Вязкость совтолов дана при 65° С.⁶ Все электроизоляционные жидкости (масла) не должны содержать водорастворимых кислот, щелочей и механических примесей.⁷ Вазелин естественный получают в процессе переработки нефти. Вазелин искусственный получают совмещением церезина с нефтяным маслом. В конденсаторостроении преимущественное применение получил вазелин естественный. Он обладает более стабильными свойствами.

Основные характеристики синтетических полимерных диэлектриков (термопластических пластмасс)

Наименование диэлектрика	Плотность, кг/м ³	Предел прочности при				Теплостойкость по Мартенсу, °C	Холодостойкость, °C	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	Водопоглощение за 24 ч, %	Электрические параметры при 20° C				Общая характеристика и цена за 1 кг
		растяжения, МПа	сжатия, МПа	статическом изгибе, МПа	ударном изгибе ¹ , кДж/м ²					ρ , Ом·м	ϵ_r при 50 Гц	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	
Полистирол ²	1050—1070	35 ⁴ —60	85—100	80—90	6—15	75—85	—(60—70)	0,80—0,82	0,00—0,02	10 ¹⁸ —10 ¹⁶	2,4—2,6	(2—8)×10 ^{—4}	25—40 ⁴	Прозрачный термопластичный материал, применяется для изготовления каркасов, катушек, оснований, изоляционных пленок ⁴ , нитей и лаков. 52—63 коп.
Полиэтилен ³	920—960	12—40 ⁴	—	1,2—3,8	Не ломается	50—65	—(65—70)	0,25—0,33	0,00—0,005	10 ¹⁸ —10 ¹⁵	2,2—2,4	(2—6)×10 ^{—4}	35—60 ⁴	Непрозрачный термопластичный материал. Применяется для изготовления твердых изоляционных деталей (полиэтилен высокой плотности), а также гибкой изоляции проводов, кабелей (полиэтилен низкой плотности). 54 к. — 1 р. 09 к.
Фторопласт-3	2100—2180	30—40 ⁵	80—150	60—80	16—20	70—75	—(180—190)	0,06—0,08	0,00—0,01	10 ¹⁸ —10 ¹⁶	2,8—3,0	(10—15)×10 ^{—3}	15—20 ⁵	Роговидный негорючий материал ⁷ , при 20° C не растворяется, устойчив в интервале температур от —180 до +100° C. 10—12 руб.
Фторопласт-4 ⁷	2100—2800	15—25 ⁶	20—25	11—14	120—150	200—250	—(195—200)	0,30—0,32	0,00	10 ¹⁶ —10 ¹⁷	1,9—2,2	(1—3)×10 ^{—4}	25—27 ⁶	Твердый негорючий материал, используемый в виде плат, а также в конденсаторах, проводах в виде лент ⁶ и суспензии, наносимой на провод с последующим горючим обжатием. 9 р. 70 к. — 10 р. 80 к.
Эскалон ⁶	960—1000	45—60	—	50—60	10—20	138—150	—(60—65)	0,82	0,005	10 ¹⁸ —10 ¹⁵	2,8—3,0	(5—8)×10 ^{—4}	30—35	Твердый рогообразный материал, подвергающийся всем видам механической обработки, выпускается в виде брусков, стержней и труб. 1 р. 20 к.

Наименование диэлектрика	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, при				Темперостойкость по Мартенсу, °С	Холодостойкость, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Водопоглощение за 24 ч, %	Электрические параметры при 20°С				Общая характеристика и цена за 1 кг
		растяжения, МПа	сжатия, МПа	статическом изгибе, МПа	ударном изгибе, кДж/м ²					ρ , Ом·м	ε_r при 50 Гц	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	
Полипропилен ⁸ (капрон)	1130—1150	50—60	50—60	60—85	105—160	50—55	—(10—20)	0,8	1,3—1,4	10^{10} — 10^{11}	3,6—5,0	$(12—27) \times 10^{-8}$	15—18	Твердый материал с повышенной дугоустойкостью, применяется для изготовления каркасов катушек, изоляционных пленок и нитей (из экстрагированного капрона). 1 р. 65 к. — 1 р. 95 к.
Полиуретан ⁹	1170—1220	50—60	60—80	60—80	40—50	60—65	—(30—35)	0,28	0,0—0,2	10^{12} — 10^{13}	4—5	$(8—12) \times 10^{-3}$	20—25	То же, но материал с повышенной водостойкостью. Применение: пористые пластмассы и лаки. 2 р. 80 к. — 3 р. 25 к.
Лавсан ¹⁰	1300—1400	12—20	—	—	—	Температура размягчения 230—250°С	—(55—60)	0,82	0,1—0,5	10^{11} — 10^{16}	3,0—3,5	$(2—6) \times 10^{-2}$	80—120	Прозрачный материал; применяется в виде изоляционных пленок в электромашинах (пазовая изоляция) низкого напряжения и конденсаторах. 1 р. 50 к. — 2 р. 07 к. ¹⁵
Винипласт ¹¹	1350—1400	40—60	90—150	10—12	150—180	25—35	—(25—40)	0,18	0,8—1,0	10^{10} — 10^{11}	3,2—4,0	$(1—5) \times 10^{-2}$	15—30	Электронизоляционные детали с высокой механической прочностью (платы, основания и др.), очень стойкие к удару. Дугогасящий материал. 1 р. 30 к.
Полиметилметакрилат ¹²	1180—1200	45—55	70—85	60—65	10—12	50—80	—(60—70)	0,17	0,2—0,3	10^{11} — 10^{12}	3,5—3,9	$(2—6) \times 10^{-2}$	20—40	Электронизоляционные детали (основания, панели, трубки для разрядников), шкалы и др. Дугогасящий материал. 1 р. 14 к. — 1 р. 32 к.

Поливинил-хлорид (пластики) ¹³	1260—1600	10—20	—	—	Не ломается	—	— (35—50)	0,18	0,1—0,3	10^{10} — 10^{12}	6—8	$(5-8) \times 10^{-2}$	6—15	Гибкие рулонные материалы, применяемые для изоляции, а также для защитных оболочек проводов и кабелей; изоляционные шланги и трубки. 1 р. 50 к.
Полиформальдегид ¹⁴	1430	65—70	30	100—108	90—150	80—100	— (40—45)	—	0,3—0,4	10^{12} — 10^{13}	3,7—4,0	$(1-4) \times 10^{-3}$	20—22	Твердый рогеобразный материал с высокими антифрикционными свойствами. 1 р. 78 к.

¹ Эту характеристику называют также ударная вязкость.

² Полистирол выпускается: блочный (пластины, листы, бруски) и эмульсионный — в виде порошка, из которого прессуют или отливают (под давлением) различные электроизоляционные детали. Из полистирола изготавливают подстирольные пленки и ленты толщиной 20—100 мкм. Основные характеристики блочного и эмульсионного полистирола укладываются в пределы, приведенные в таблице. У изделий температура размягчения полистирола 95—125° С. У ударопрочных сортов полистирола предел прочности при ударном изгибе составляет 40—50 кДж/м².

³ Полиэтилен выпускается в виде гранул, блоков, а также пленок, лент и нитей. Различают полиэтилены высокого (полнэтилен ВД), среднего (СД) и низкого (полиэтилен НД) давления. Последний отличается большей плотностью, повышенной механической прочностью и теплоустойкостью, но менее эластичен по сравнению с полиэтиленом ВД. Полиэтилен перерабатывается в изделия методом литья под давлением (каркасы, катушки, панели и др.), прессования и экструзии (горячее шприцевание). Вследствие содержания от 60 до 90% (НД) кристаллической фазы полиэтилены имеют ярко выраженную температуру плавления (105—140° С). Полиэтилены при комнатной температуре не растворяются ни в одном из растворителей.

⁴ У тонких (0,02—0,09 мм) полистирольных пленок (стиропленка) $E_{пр} = 100 \div 120$ МВ/м. Предел прочности при растяжении у стиропленок равен 50—80 МПа. У полнэтиленовых пленок $E_{пр} = 35 \div 70$ МВ/м, а предел прочности при растяжении 20—40 МПа.

⁵ У тонких пленок и лент, полученных из фторопласта-3: $E_{пр} = 80 \div 100$ МВ/м, а предел прочности при растяжении 30—40 МПа.

⁶ У тонких пленок и лент, полученных из фторопласта-4, $E_{пр} = 100 \div 120$ МВ/м, а предел прочности при растяжении 12—30 МПа.

⁷ Фторопласт-3 при 300—315° С и выше разлагается с выделением мономера — газа. Температура плавления 200—220° С. При механических нагрузках применяется при температурах 70° С. У фторопласта-4 процесс денополимеризации начинается с 400° С и выше. Максимальная рабочая температура фторопласта-4 250° С. У фторопласта-4 наблюдается текучесть при 20° С (холодная

текучесть) при механических напряжениях, превышающих 3 МПа. У фторопласта-3 холодная текучесть отсутствует. У всех фторопластов отмечается низкая коррозийность.

⁸ Эскапон или термоэбонит — материал, получаемый в результате полимеризации синтетического каучука при 250—300° С без введения серы.

⁹ Температура плавления капрона 210—220° С. Рабочие температуры капрона не должны превосходить 100° С. Температура плавления полиуретана 175—180° С.

¹⁰ Лавсан (пленки) используется также в композициях со слюдой или стеклотканью в качестве пазовой изоляции в электрических машинах в интервале температур от —55 до +120° С.

¹¹ Винипласт — материал на основе поливинилхлорида (без пластификаторов), изготавливается в виде пленок, листов и плит толщиной 0,3—20 мм, а также труб, стержней, уголков. Винипласт — термопластичный негорючий материал, хорошо сваривается, поддается механической обработке, очень стоек к химическим активным средам (кислоты, щелочи, озон), растворителям и маслам. В ароматических и хлорированных углеводородах (бензол, толуол, хлорбензол и др.) частично растворяется. Температура разложения его 150—160° С.

¹² Полнметилметакрилат выпускается в виде органического стекла (оргстекло СО) и порошка, из которого получают (горячим прессованием или литьем под давлением) различные детали, стойкие к минеральным маслам, бензину и щелочам. При 80—120° С изделия из полнметилметакрилата размягчаются, а при 250—300° С материал разлагается. При воздействии электрической дуги материал выделяет газы, вызывающие гашение дуги, поэтому полнметилметакрилат применяют в трубчатых разрядниках. Органическое стекло штампуются при 80—120° С.

¹³ Данные таблицы относятся к гибким электроизоляционным пластикам (светостойким), применяемым для изоляции проводов и кабелей, для изоляционных шлангов и трубок и для линеек изоляционных лент.

¹⁴ Электроизоляционные и конструкционные детали из полиформальдегида изготавливают литьем под давлением.

¹⁵ 2 р. 67 к. за 1 кг лавсановой пленки толщиной 8—10 мкм.

Основные характеристики электротехнических терморезистивных пластмасс

Наименование или марка пластмассы	Плотность, кг/м³	Предел прочности при				Темпостойкость по Мартенсу, °С, не менее	Водопоглощаемость за 24 ч, %	Электрические характеристики при 20° С				Общая характеристика и области применения
		растяжения, МПа	сжатия, МПа	статическом изгибе, МПа	ударном изгибе, кДж/м²			ρ_v , Ом·м	ϵ	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	
01-040-02, 03-010-02, 04-010-12, 010-200-07, 02-030-02, 07-010-02, 02-010-02	1400—1450	35—50	140—185	60—70	4—6	125—135	0,20—0,30	10 ⁸ —10 ⁷	6—9	0,08—0,15	8—10	Материалы на основе новолачных смол или смесей новолачных и резольных смол с органическими и минеральными наполнителями. Применение: конструкционные детали в электрических аппаратах и приборах и изоляционные детали в устройствах низкого напряжения. Цена 48—58 к. за 1 кг
ВХ2-090-69, ВХ1-090-34, ВХ2-090-68, ВХ3-090-14, ВХ5-010-73, ЖК1-010-40, ЖК2-040-60, ЖК3-010-62, ЖК4-010-62	1500—1900	25—40	120—190	45—75	3,5—7	125—140	0,04—0,09	10 ⁸ —10 ⁹	6—8	0,05—0,08	10—15	Материалы на основе новолачных смол с минеральными и органическими наполнителями. Применяются для конструкционных и изоляционных деталей в устройствах низкого напряжения. Цена 39—52 к. за 1 кг
Э2-330-02, Э1-340-02, Э3-340-65, Э9-342-73, Э10-342-63, Э3-340-61, Э7-361-73	1800—1900	25—55	110—180	35—50	3,5—6	150—200	0,03—0,09	10 ⁸ —10 ¹¹	6—8	0,01—0,03	15—20	Материалы на основе резольных (феноланилинформальдегидных или крезолоформальдегидных смол) с органическими или минеральными (слода, кварцевая мука) наполнителями. Применение: электроизоляционные детали (основания, панели и др.) в электрических аппаратах и приборах. Цена 1 р. 20 к. — 1 р. 45 к. за 1 кг

В1, В2, В3, В4, В5, Д1, Е1	1600—1800	35—45	120—150	50—70	4—5	150—170	0,55	10^{10} — 10^{12}	4—6	0,03—0,05	12—14
	1800—2000	30—40	120—130	40—100	10—30	180—200	1÷3	10^{10} — 10^{11}	4—5	0,05—0,06	5—10
КМК-218, ПК-9, ПК-10, КФ-9, КФ-10, ВПМ-1В, ВПМ-1К, КЭП-1, КЭП-2	1500—2000	20—70	130—140	50—90	6—60	250—350	0,08—0,3	10^{12} — 10^{13}	3,5—5,5	0,005—0,028	5—8
	1450—1950	30—35	100—120	80—90	9—10	140—195	0,2—0,4	10^7 — 10^8	8—10	0,7—0,8	3—4
У1-301-07 (волокнит), У3-301-07, У5-301-41	1700—1900	50—60	130—200	150—200	50—200	280—320	0,02—0,02	10^{10} — 10^{12}	7—8	0,03—0,05	13
	1900	500—600	200—200	400—600	250—250	280—300	0,02—0,02	10^{12}	8	0,05—0,03	15
АГ-4В АГ-4С АГ-4СН											

Материалы на основе меламиноформальдегидной смолы с минеральными и органическими наполнителями, отличающиеся повышенной искроустойчивостью. Применяются для электроизоляционных деталей в приборах зажигания и в других видах электрооборудования. Цена 1 р. 24 к. — 2 р. 55 к. за 1 кг

Материалы на основе кремнийорганических смол и минеральных наполнителей. Применение: изоляционные изделия повышенной нагревостойкости и дуговой стойкости. Цена 1 р. 05 к. — 3 р. 25 к. за 1 кг

Материалы на основе модифицированных резольных смол и волокнистых наполнителей, отличаются повышенной механической прочностью. Применение: конструкционные и изоляционные детали. Цена 50—72 к. за 1 кг

Материалы на основе модифицированной фенолформальдегидной смолы, стекловолокна (АГ-4В) или стеклонитей, обладают высокой теплостойкостью и механической прочностью при хороших электрических характеристиках. Цена 2 р. 40 к. — 3 р. 55 к. за 1 кг

9-5. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ БУМАГИ И КАРТОНЫ

Основные характеристики электроизоляционных бумаг и картонов

Таблица 9-6

Материал ^а	Марка	Толщина, мкм	Плотность, кг/м ³	Разрывное усилие, Н, не менее ^а	Воздухопроницаемость ^а , мл/мни	Электрические характеристики при 50 Гц и 20° С		Общая характеристика и область применения	Цена за 1 кг
						tgδ	U _{пр} , кВ		
Бумага конденсаторная	КОН-1	7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 22, 30	1000	Разрывная длина ¹ 8000 м	3—5	0,0014—0,0016	300—590	Применяется в бумажных конденсаторах	1 р. 32 к. — 4 р. 70 к.
	КОН-2	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 22, 30	1170—1250	8000—8500 м ¹	2—50 ²	0,0016—0,0018	260—620	То же, но с повышенной плотностью	1 р. 19 к. — 5 р. 94 к.
	Силкон 0,8	12 и 15	800	8000 м ¹	7	0,0009	390—420	С улучшенными электрическими характеристиками. Применяется в бумажных конденсаторах	1 р. 65 к.
	Силкон 1	7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 22, 30	1000	8000 м ¹	3—5	0,0010—0,0012	320—620	То же	1 р. 70 к.
	Силкон 2	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 22, 30	1170—1250	8000—8500 м ¹	2—30	0,0014—0,0015	270—680	То же, но с повышенной плотностью	1 р. 74 к.

Материал ⁷	Марка	Толщина, мкм	Плотность, кг/м ³	Разрывное усилие, Н, не менее ⁸	Воздухопроницаемость ⁹ , мл/мин	Электрические характеристики при 50 Гц и 20° С		Общая характеристика и область применения	Цена за 1 кг ¹
						tgδ	U _{пр} , кВ		
Бумага ⁸ ка- бельная	K-080	80	760	40/85	25	Не нормируется	Не нормируется	Кабельная обыкновенная применяется для изоляции жил кабелей напряжением до 35 кВ включительно	33 к.
	K-120	120	760	60/130	25				
	K-170	170	760	85/175	25				
	KM-120	120	760	65/145	25	Не нормируется	Не нормируется	Кабельная четырехслойная. Область применения та же, что и бумаги «К»	47—50 к.
	KM-170	170	760	95/190	25				
	KB-030	30	850	15/34	15	0,0025	Не нормируется	Кабельная высоковольтная. Применяется для изоляции жил кабелей напряжением от 35 кВ и выше	84—92 к.
	KB-045	45	850	23/53	25				
	KB-080	80	850	42/90	25				
	KB-120	120	850	65/140	20				
	KB-170	170	850	90/185	20				
	KB-240	240	850	100/220	25				
	KBY-015	15	1090	9/21	5	0,027	Не нормируется	Кабельная высоковольтная уплотненная. Область применения та же, что и бумага KB	1 р. 01 к. 1 р. 42 к.
	KBY-020	20	1090	12/28	5				
	KBY-080	30	1100	20/45	5				
	KBY-045	45	1100	30/68	5				
	KBY-080	80	1100	53/120	10				
	KBY-120	120	1100	85/175	10				
	KBM-080	80	760	40/35	25	0,023	Не нормируется	Кабельная высоковольтная многослойная. Применяется для изоляции жил кабелей напряжением от 110 кВ и выше	1 р. 00 к.
	KBM-120	120	760	65/145	25				
	KBM-170	170	760	35/190	20				
	KBM-240	240	760	105/230	10				
	KBMU-080	80	1100	55/130	6	0,0024		Область применения та же, что и бумага KBY	1 р. 05 к.
	KBMU-120	120	1100	85/180	6				
Бумага кабельная полупроводящая ⁸	KП-045	45	850	20/45	25	$\rho_V = 10-10^8$ Ом·м		Полупроводниковая бумага с содержанием сажи. Применяется для экранирования жил кабелей	40 к.—44 к.
	KП-080	80	850	40/85	25				
	KП-120	120	850	55/120					
	KПД-080	80	850	40/85	25	$\rho_S = 10^8 \div 10^9$ Ом		То же, но сажа вводится в один слой бумаги. Область применения та же, что и бумага КП	36 к.
	KПД-120	120	850	55/120	11				
Бумага телефонная ⁸	КТ-04	40	800	15/45	—	Не нормируется		Применяется для изоляции жил телефонных кабелей	33 к.
	КТ-05	50	800	20/60					

Бумага кре- пированная	ЭКТ	500	230	30—32 (в продольном направлении)	—	Не нормиру- ется	15 МВ/м ²	Применяется для изоляции отдельных узлов маслonaпол- ненных аппаратов	37 к.—62 к.
Картон элект- роизоляционный (для работы в воз- душной среде) ⁶	ЭВС	0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40 мм	1250	35—120 МПа	—	Не нормиру- ется	11—12 МВ/м ²	Картон каландрированный выпускается в листах и в ру- лонах (ЭВ; ЭВС) или только в рулонах (ЭВП, ЭВТ). Применя- ется для работы в воздушной среде (каркасы катушек, про- кладки и др.) с последующей пропиткой лаками	45 к.—67 к.
	ЭВП	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 мм	1250	35—120 МПа	—	То же	11—12 МВ/м ²		38 к.—43 к.
	ЭВТ	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,50 мм	1150	325—120 МПа	—	То же	12—13 МВ/м ²		48 к.
	ЭВ	Те же размеры и 0,6; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0; 2,5; 3,0 мм	950— 1150	325—90 МПа	—	То же	8—11 МВ/м ²		40 к.
Картон элект- роизоляционный для аппаратов с масляным запол- нением ⁶	А	2,0; 2,5; 3,0 мм	900— 1000	40 МПа	Не норми- руется	Не нормиру- ется	40—50 ⁵	Эластичный, гибкий картон применяется в трансформаторах напряжением до 750 кВ вклю- чительно (цилиндры и др.)	37 к.—42 к.
	Б	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 мм	1000— 1150	50 МПа	То же	То же	51—85 ⁵	Плотный, применяется в апа- ратах напряжением до 220 кВ	42 к.—45 к.
	В	2,0; 2,5; 3,0 мм	1150— 1250	60 МПа	То же	То же	55—70 ⁵	Картон твердый с малой сжимаемостью. Применяется в продольной изоляции трансфор- маторов и др.	54 к.
	Г	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм	1000— 1200	40 МПа	То же	То же	48—57 ⁵	Картон с повышенным со- противлением расслаиванию	64 к.
Фибра листо- вая	ФЭ	от 0,6 до 1,7 (через 0,1 мм) 2,0; 2,2; 2,5; 3,0 до 12 мм (через 1 мм)	1,1— 1,2	Вдоль ⁷ 7—8 МПа	То же	То же	3,5—7,5 МВ/м ²	Фибра электроизоляционная (прокладки, шайбы)	1 р.—1 р. 24 к.

¹ Для конденсаторных бумаг приведены наименьшие значения разрывной длины (м), т. е. длины, при которой наступает разрыв бумаги данной толщины под действием собственного веса.

² Большие значения воздухопроницаемости относятся к конденсаторным бумагам меньшей толщины (4—5 мкм).

³ Меньшие значения разрывных усилий кабельных бумаг (числитель) относятся к образцам, вырезанным в поперечном направлении полотна бумаги, большие же значения (знаменатель) относятся к образцам, вырезанным вдоль полотна бумаги. Разрывное усилие прикладывается к полоске бумаги шириной 15 мм.

⁴ Для фибры и картонов при работе этих материалов в воздушной среде нормируются значения электрической прочности.

⁵ Для картонов марок А, Б, В и Г приведены испытательные напряже-

ния, которые прикладываются к образцам картона в течение 1 м. Большие значения напряжения относятся к образцам бумаги большей толщины.

⁶ Для картонов и фибры приведены значения предела прочности образцов материала при растяжении (МПа).

⁷ Электроизоляционные бумаги выпускаются в рулонах шириной: от 12 до 750 мм (конденсаторная), от 12 до 40 мм (крепированная) и от 350 до 800 мм (кабельная). Картоны для работы на воздухе толщиной от 0,1 до 0,8 мм выпускают в рулонах шириной от 500 до 1050 мм, а картоны толщиной от 1 мм и выше — в листах шириной от 850 до 1850 мм и длиной от 980 до 3850 мм. Картоны для работы в масле толщиной до 0,5 мм выпускаются в рулонах, а при толщине более 0,5 мм в листах.

⁸ Удельное объемное сопротивление бумаг, картонов и фибры составляет 10¹⁰—10¹¹ Ом·м, а у полупроводящих бумаг 10⁷—10⁸ Ом·м.

9-6. СЛОИСТЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПЛАСТМАССЫ

Т а б л и ц а 9-7

Основные размеры и области применения слоистых электроизоляционных пластмасс

Материал	Марка	Номинальная толщина листов, мм	Площадь листов, мм²	Преимущественное назначение и цена за 1 кг
Гетинакс	I	0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5,0; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,3; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 41; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49; 50	550×700 650×930 700×930 930×1030 930×1430	Для работы на воздухе при нормальных климатических условиях при 50 Гц и напряжении до 1000 В или в трансформаторном масле; от 65 к. до 2 руб.
	II	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50	То же	То же с более широкими допусками по толщине; коробление не нормируется; от 58 до 70 к.
	III	5; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,3; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50	» »	Для работы в условиях повышенной влажности при 50 Гц и напряжении до 1000 В; 65 к.
	IV	2; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,3; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50	» »	Для работы на воздухе в условиях влажного тропического климата при 50 Гц и напряжении до 1000 В или в трансформаторном масле; 85 к.
	V-I V-II	Выпускаются той же толщины, что и гетинакс марки III	» »	Для работы в трансформаторном масле при 50 Гц и напряжении выше 1000 В или на воздухе при нормальных климатических условиях; 3 руб.
	VI	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,3; 3,5; 3,8	» »	Для работы на воздухе в нормальных климатических условиях при 10 ⁶ Гц и напряжении до 1000 В; 1 р. 10 к.
	VII	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,3; 3,5; 3,8	» »	То же, но с улучшенным тангенсом угла диэлектрических потерь и с пониженной стоимостью к кратковременному нагреву; 1 р. 26 к.
	VIII	1,0; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,3; 3,5; 3,8	» »	Для работы в нормальных климатических условиях при 10 ⁶ Гц и напряжении 1000 В для изготовления печатных схем; 3 р. 60 к.
Текстолит	A	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 24; 25; 26; 28; 30; 32; 33; 35; 36; 38; 40; 42; 45; 48; 50	Не менее 450×600	Для работы в трансформаторном масле и на воздухе при 50 Гц с повышенными электрическими характеристиками; от 3 р. 40 к. до 6 р. 30 к.
	B	Выпускается той же толщины, что и текстолит марки A	То же	Для работы на воздухе при частоте 50 Гц с повышенными механическими характеристиками; от 3 р. 40 к. до 6 р. 70 к.
	Г	Выпускается той же толщины, что и текстолит марки A	» »	Для работы в трансформаторном масле и на воздухе, но с расширенными допусками по толщине и короблению; от 3 р. 20 к. до 5 р. 85 к.
	BЧ	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8,0	» »	Для работы на воздухе в нормальных климатических условиях при 10 ⁶ Гц; 9 руб.

Продолжение табл. 9-7

Материал	Марка	Номинальная толщина листов, мм	Площадь листов, м ²	Преимущественное назначение и цена за 1 кг
Стекло- текстолит	СТ	1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30	(450—980) × ×(600—1480)	Для работы при напряжении до 1000 В и 50 Гц на воздухе при нормальных климатических условиях (до 130° С); 2 р. 60 к.
	СТ-I	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30	То же	То же, но с более однородной внутренней и поверхностной структурой в исходном состоянии и после механической обработки; от 3 р. 35 к. до 4 р. 20 к.
	СТ-II	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5	» »	С повышенной жесткостью при рабочих температурах для работы под напряжением до 1000 В и 50 Гц на воздухе — при нормальных климатических условиях; 4 р. 60 к.
	СТЭФ	1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30	» »	Для работы при напряжении свыше 1000 В и 50 Гц в нормальных условиях на воздухе, а также до 1000 В во влажной атмосфере при 35° С 4 р. 00 к.
	СТЭФ-I	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30	» »	То же, но с более однородной внутренней и поверхностной структурой в исходном состоянии и после механической обработки; от 4 р. 50 к. до 5 р. 60 к.
	СТК	Выпускается той же толщины, что и стеклотекстолит марок СТ-I и СТЭФ-I	» »	Для работы при напряжении свыше 1000 В на воздухе в нормальных условиях до 180° С, а также до 1000 В во влажной атмосфере при 35° С; 8 р. 30 к.
	СТВК	0,35—50	» »	Для работы в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха 95% при температуре 35° С) при напряжении до 1000 В и 50 Гц; от 19 р. до 35 р.
	СТК-41/ЭП	0,35; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	» »	Для работы в электрических машинах и аппаратах теплоустойчивого и тропического исполнения в изоляции с классом нагревостойкости Н (180° С); 9 руб.
Асбо- текстолит	АСТ-A	6; 8; 10; 12; 15; 16; 18; 20; 22; 23; 25; 28; 30; 32; 35; 37; 38; 40; 42; 44; 46; 48; 50; 52; 55; 58; 60	(450—1000) × ×(600—2480)	Материал на основе асбестовой ткани и бакелитовой смолы. Нагревостойкость 130° С. Применяют для клиньев и распорок, в роторах турбогенераторов и другом электрооборудовании; 2 руб.
	АСТ-B	Те же размеры	То же	То же, но с более однородной структурой и повышенными механическими свойствами; 2 р. 80 к.
Дельта- древесина	ДСП-B-Э	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 10; 12; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60	(700—5600) × ×(800—1200)	Для конструкционных и электроизоляционных деталей, работающих в трансформаторном масле для работы на открытом воздухе (растяжки троллейных проводов и др.), требует тщательной защиты от влаги. 68 к.
	ДСП-B-Э	15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 50	(700—5600) × ×(1000—1200)	То же, но обладает менее высокой механической прочностью и несколько пониженными электрическими характеристиками; 58 к.

Таблица 9-8а

Физико-механические характеристики слоистых электроизоляционных пластмасс

Материал	Марка	Плотность, кг/м³	Ударная вязкость², кДж/м² (не менее)	Предел прочности, МПа, при		Теплостойкость (по Мартенсу), °C (не менее)	Теплопроводность, Вт/(м·°C)
				растяжении не менее	статическом изгибе² не менее		
Гетинакс	I	1350—1450	15/8¹	80	100	150	0,170—0,175
	II	1350—1450	15/8	80	100	150	
	III	1300—1400	13/—	70	100	150	
	IV	1280—1380	5/4	60	60	150	
	V-I; V-II	1280—1400	10/8	60	80	150	
	VI	1300—1400	—/8	70	—⁴	—	
	VII	1350—1450	—/80	70	—	—	
	VIII	1300—1400	—/80	60	—	—	
Текстолит	A	1300—1450	12—35	35—85	70—120	135—150	0,146—0,162
	B	1300—1450	15—40	45—90	80—140	135—150	
	BЧ	1300—1450	—	45—75	—⁴	—	
	Г	1300—1450	12—40	35—90	70—140	135—150	
Стеклотекстолит³	СТ	1600—1800	15/12	70	95	185	0,178—0,182
	СТ-I	1600—1800	20/15	75	100	185	
	СТ-II	1600—1800	25/15	100	—	185	
	СТЭФ	1600—1800	60/50	175	220	185	
	СТЭФ-I	1600—1800	65/54	200	240	185	
	СТК	1600—1800	50/30	90	110	250	
	СТВК	1600—1800	—	98	127	250	
	СТК/ЭП	1600—1800	60/20	190	215	200	
Асботекстолит	АСТ-A	1550	20	75	95	155	—
	АСТ-B	1650	22	80	110	155	
Дельта-древесина	ДСП-B-Э	1300—1400	30	140	130	140	0,164—0,168
	ДСП-B-Э	1300—1400	80	260	280	180	

¹ В числителе указаны значения для гетинакса толщиной 10 мм и более, в знаменателе от 1,0 до 9,5 мм.

² Ударная вязкость и предел прочности при статическом изгибе определяются в направлении, перпендикулярном слоям — у всех слоистых материалов.

³ При определении механических характеристик у стеклотекстолита образцы этого материала вырезают вдоль утка ткани.

⁴ У этих материалов предел прочности при статическом изгибе не определяется из-за малой толщины материалов.

Таблица 9-86

Электрические характеристики слоистых электроизоляционных пластмасс

Материал	Марка	Электрические характеристики при 20 °С				
		ρV , Ом·м	ρS , Ом	ϵ_r , при 50 Гц	$\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц	$E_{\text{пр}}$ перпендикулярно слоям, МВ/м
Гетинакс	I	10^8 — 10^{10}	10^{10} — 10^{11}	6—8	0,04—0,06	12—26
	II	10^8 — 10^9	10^{10} — 10^{11}	6—8	0,05—0,08	12—22
	III	10^8 — 10^{10}	10^{10} — 10^{11}	6—8	0,02—0,06	13—23
	IV	10^8 — 10^{10}	10^{10} — 10^{11}	6—7	0,03—0,05	15—26
	V-1; V-2	10^8 — 10^{10}	10^{11} — 10^{12}	6—8	0,02—0,04	20—28
	VI	10^8 — 10^9	10^{10} — 10^{11}	6—7 ¹	0,04—0,06 ¹	20—38
	VII	10^9 — 10^{10}	10^{11} — 10^{13}	6—7 ¹	0,03—0,04 ¹	22—36
	VIII	10^{10} — 10^{11}	10^{12} — 10^{13}	6—7 ¹	0,02—0,03 ¹	25—38
Текстолит	A	10^8 — 10^{10}	10^{10} — 10^{11}	5—6	0,06—0,19	При 90 °С: 5—12
	Б	10^7 — 10^9	10^{10} — 10^{11}	5—7	—	При 90 °С: 3—6
	ВЧ	10^9 — 10^{10}	10^{11} — 10^{13}	При 10^6 Гц: 6—8	0,05—0,06 ¹	6—16
	Г	10^8 — 10^9	10^{10} — 10^{11}	5—6	—	3—6
Стеклотекстолит	СТ	10^{10} — 10^{11}	10^{11} — 10^{12}	7—8	—	12—15
	СТ-I	10^{10} — 10^{11}	10^{11} — 10^{12}	7—8	—	12—15
	СТ-II	10^{12} — 10^{13}	10^{12} — 10^{13}	6—7	—	18—20
	СТЭФ	10^{11} — 10^{12}	10^{12} — 10^{14}	7—8	0,02—0,03	25—28
	СТЭФ-I	10^{11} — 10^{12}	10^{13} — 10^{14}	7—8	0,02—0,03	30—32
	СТК	10^{10} — 10^{12}	10^{12} — 10^{14}	6—7	0,04—0,06	18—20
	СТКВ	10^{12} — 10^{13}	10^{13} — 10^{12}	6—7	0,006—0,007	10—20
Асботекстолит	—	10^6 — 10^9	10^9 — 10^{10}	7—8	0,2—0,5	1,5—2,0
Дельта-древесина	ДСП-В-Э	10^9 — 10^{10}	10^{10} — 10^{11}	7—8	0,06—0,2	6—9
	ДСП-Б-Э	10^8 — 10^9	10^{10} — 10^{11}	7—8	0,08—0,3	5—8

¹ При частоте 10^6 Гц.

Основные характеристики электроизоляционных составов (компаундов)

Классификация по назначению	Марка или обозначение компаунда	Составляющие части	Температура размягчения, °С	Холодостойкость, °С (не выше)	Объемная усадка при охлаждении, % (не более)	Электрические характеристики при 20 °С			Общая характеристика и области применения	Цена 1 кг
						ρ , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	$\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц		
Пропиточные	225 ^а	Битум ухтинский, каинфоль, масло льняное обезвоженное	98—102 ^б	—25	8,0—8,5	10 ¹¹ —10 ¹²	20—22	0,02—0,03	Блестящая аморфная водостойкая масса черного цвета. Применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов (пропитка при 160° С под давлением). Нагревостойкость 105° С	1 р.
	Битумный ^в	Битум марок БН-V, БН-III-VB и специальный	95—100 ^б	—22	8,5—9,5	10 ¹⁰ —10 ¹¹	15—20	0,03—0,05	То же, но менее эластичная масса. Применяется для пропитки катушек (при 140—150° С) под давлением. Нагревостойкость 105° С	15 к.
	КГМС-1 ^д	Непредельный полиэфир № 1, стирол, перекись бензоила, гидрохинон	250	—60	6—7	10 ¹¹ —10 ¹²	18—22	0,02—0,04	Аморфная масса желтого цвета, обладающая хорошей адгезией, высокой механической прочностью и водостойкостью. Применяется для пропитки обмоток трансформаторов и аппаратов	2 р. 30 к.
	КГМС-2 ^д	Непредельный полиэфир № 2, стирол, перекись бензоила, гидрохинон	250	—60	8—10	10 ¹¹ —10 ¹²	18—20	0,02—0,04	То же, но отвердевший компаунд, обладает большей эластичностью	2 р. 90 к.
	К-43	Состав на основе полиметилфенилсилоксана и линолеата свинца	Не размягчается ^б	—60	5—8	10 ¹² —10 ¹³	35—50	0,005—0,008	Пропитка обмоток электрических машин и аппаратов, длительно работающих при 180° С в условиях высокой влажности	3 р.
	К-67 ^б	Полиорганосилоксан с неорганическим наполнителем	То же	—60	5—6	10 ¹² —10 ¹³	22	0,006	То же, но при горячем (180° С) отверждении не выделяет летучих веществ	4 р. 40 к.
	КП-10	Смесь полиэфиров с полиэфиркрилатами и сиккативом. Компаунд холодного отверждения	Не размягчается	—50	—	10 ¹⁰ —10 ¹¹	20—22	0,02—0,03	Термореактивная масса. Обеспечивает высокую цементацию и малое время сушки. Нагревостойкость 120° С. Применяют для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов	2 р. 10 к.
	КП-18	То же, но в другом соотношении	То же	—50	—	10 ¹⁰ —10 ¹¹	28—32	0,02—0,04	То же, но более стабильн. Нагревостойкость 130° С	1 р. 80 к.

	Д-1, Д-112	Составы на основе эпоксидной смолы ЭД-16 и отвердителей	Не раз- мягчается	-50	0,5-1	$10^{10}-10^{12}$	28-30	0,01-0,02	Термореактивные массы. На- гревостойкость 130° С. Применя- ют для пропитки обмоток электрических машин и аппара- тов	4 р. 80 к.
	Д-61	Состав на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителей	То же	-50	0,5-1	$10^{11}-10^{12}$	45-50	0,01-0,02	То же, но с меньшей вяз- костью и большей пропитываю- щей способностью	4 р. 60 к.
	К-67 К-67Ф	Составы на основе олиговинилсилоксанов	» »	-60 -60	5-6 6-8	$10^{12}-10^{13}$ $10^{11}-10^{12}$	22 20	0,006 0,008	Компаунды горячего отвер- ждения ступенями при 80 и 120° С. Область применения та же	2 р. 10 к.
Пропиточно- заливочные ⁷	МБК-1	Метакриловый эфир	250	-60	0,5	$10^{10}-10^{11}$	20-22	0,05-0,07	Пропитка обмоток электри- ческих машин и заливка кату- шек и блоков электрических аппаратов ⁴	2 р. 50 к.
	МБК-2	Метакриловый эфир, пластификатор	200	-60	0,5	10^9-10^{10}	17-20	0,03-0,05	То же, но для получения бо- лее эластичной пропитки ⁶	3 р. 60 к.
	МБК-3	То же	200	-60	0,5	10^9-10^{10}	15-18	0,04-0,06	То же, но для получения ре- зиноподобной эластичной про- питки или заливочного блока ⁶	3 р. 85 к.
	ЭПК-5 ⁹	Эпоксидная смола Э-37 Полнэфир № 220 Пылевидный кварц Фталевый ангидрид	120 ⁸	-40 ¹²	0,6-1,0	$10^{12}-10^{13}$	25-30	0,01-0,03	Применяется для литой изо- ляции трансформаторов тока до 10 кВ, работающих при темпе- ратуре до 120° С	5 р. 50 к.
	К-168 ¹⁰	Эпоксидная смола ЭД-16 Полиэфир МГФ-9 Гексаметилендиамин	120 ¹⁰	-60	0,5-1,5	$10^{10}-10^{12}$	25-30	0,02-0,04	Применяется для литой изо- ляции трансформаторов тока до 10 кВ, работающих при темпе- ратуре 120° С; отверждение компаунда при 20° С	4 р. 20 к.
	К-293 ¹¹	Эпоксидная смола ЭД-16 Полиэфир МГФ-9 Пылевидный кварц Дибутилфталат	150 ¹¹	-60	1-2	$10^{10}-10^{12}$	20-25	0,05-0,08	То же, но отверждение ком- паунда происходит при 120° С. Кратковременно может рабо- тать при 150° С	4 р. 00 к.
Заливочные	К-30К	Полнуретановый компаунд с наполнителем—пылевидным кварцем	Не раз- мягчается	-80	2-3	$10^{10}-10^{12}$	21-23	0,05-0,08	Эластичная масса. Применя- ют для заливки различных уз- лов электрических приборов и аппаратов, работающих при температуре до +150° С	2 р. 90 к.

Классификация по назначению	Марка или обозначение компаунда	Составляющие части	Температура размягчения, °С	Холодостойкость, °С (не выше)	Объемная усадка при охлаждении, % (не более)	Электрические характеристики при 20 °С			Общая характеристика и области применения	Цена 1 кг
						ρ , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	$\lg \delta$ при 50 Гц		
Заливочные	К-31	То же, но без наполнителя	Не размягчается	-30	3—4	10^{12} — 10^{13}	27—29	0,03—0,05	То же, но при температуре до 120° С	2 р. 70 к.
	ЭК-3	Эпоксидная смола ЭД-16 с отвердителем	150	-50	1—2	10^{12} — 10^{14}	45—47	0,003	Твердая хрупкая масса с высокой клеящей способностью. Применяется при температуре до +150° С	4 р. 10 к.
	Виксинт К-18	Кремнийорганический компаунд	150	-60	2—3	10^{10} — 10^{12}	15—18	0,01—0,02	Нагревостойкая (до 200 °С); водостойкая эластичная масса белого цвета. Применяют для герметизации узлов электрических приборов и аппаратов	4 р.
	T-10 ⁹	Эпоксидно-кремнийорганический компаунд с наполнителем	150	-60	1—2	10^{12} — 10^{14}	20—25	0,005	Нагревостойкая (до 220° С); водостойкая твердая масса с хорошей адгезией к металлам, стеклам и керамике. Применяют для герметизации электрических узлов и аппаратов	2 р. 10 к.
	РГЛ-150	Резординоглицерино-линейной эфир	70	-55	7—7,5	10^9 — 10^{11}	14—18	0,02—0,06	В отвердевшем состоянии эластичная, резинообразная масса темно-желтого цвета, стойкая к вибрациям и не растворимая в воде, масле и органических растворителях. Применение то же, что T-10	1 р. 58 к.
Заливочные компаунды для кабельных муфт и воронок	МК-45	Канифоль, минеральное масло (автол или цилиндрическое масло)	45—48 ¹³	-8	6—7	10^9 — 10^{10}	12—18	—	Заливка кабельных соединительных и концевых муфт на 35 кВ и прошивка концов кабелей на рабочие напряжения до 3 кВ	1 р. 44 к.
	МБ-70	Битумы марок БН-V и БН-III	70—73 ¹³	-10	8—9	10^{10} — 10^{11}	14—16	—	Заливка соединительных муфт и концевых воронок до 10 кВ, проложенных в земле или установленных в неотапливаемых помещениях (до -10° С)	9 к.

МБ-90	Битумы марок БН-V и БН-III-V или Г и БН-III	90—92 ¹³	—10	8—9	10 ¹⁰ —10 ¹¹	14—16	—	Заливка соединительных и концевых воронок до 10 кВ, установленных в отапливаемых помещениях	9 к.
МБМ-1 (Э-3)	Битумы марок БН-V, БН-III и масло транс- форматорное	55—62 ¹³	—35	7—8	10 ¹⁰ —10 ¹¹	15—17	—	То же, но в наружных элект- роустановках с температурой до —35° С	8 к.
МБМ-2	То же, но в другом соотношении	55—60 ¹³	—45	7—8	10 ¹⁰ —10 ¹¹	15—17	—	То же, но в наружных элект- роустановках с температурой до —45° С	8 к.
КХЗ-158- ВЭИ ¹⁴	На основе резинатов, канифоли и битума	80—82 ¹⁴	—40	0,9—1,1	10 ⁹ —10 ¹⁰	10—13	0,05—0,08	Эластичная влагостойкая масса черного цвета с малой объемной усадкой. Применяет- ся для заливки кабельных муфт и изоляторов	15 к.

¹ Этот компаунд известен под маркой 225-Д. Отвержденный компаунд 225 имеет плотность 980—1000 кг/м³. Наибольшая допустимая рабочая температура обмоток, пропитанных этим компаундом, 105° С.

² Температура размягчения по методу «колыда» и «шара».

³ Отвержденный битумный компаунд имеет плотность 990—1050 кг/м³. Наибольшая допустимая рабочая температура компаунда 105° С.

⁴ Компаунды КГМС-1 и КГМС-2 в исходном состоянии представляют собой жидкости с высокой пропитывающей способностью (110—120 листов микрокалентной бумаги). Предварительно высушенные обмотки пропитываются этими компаундами при комнатной температуре (в тренировочном режиме). Отверждение (полимеризация) компаундов производится при 60—100° С. В отвержденном состоянии компаунды КГМС-1 и КГМС-2 являются термореактивными веществами, размягчающимися только с поверхности (при 250° С). Они могут длительно работать при температурах от —60 до +120° С (класс нагревостойкости Е).

⁵ Теплостойкость (термоэластичность пленки компаунда К-43) на медной подложке при 200° С 150—350 ч; tg δ при 180° С 0,013—0,095. Пропитка обмоток производится при 55—65° С в тренировочном режиме.

⁶ Пропитку обмоток производят предварительно вакуумированным составом, нагретым до 50—60° С.

⁷ Компаунды МБК могут применяться в интервале температур от —60 до +105° С (без наполнителя) и от —60 до +120° С с наполнителем (пылевидный кварц). В отвержденном состоянии наибольшей механической прочностью при растяжении (7 МПа) обладает компаунд МБК-1. В исходном состоянии компаунды МБК представляют собой жидкости, которые превращаются в твердые термореактивные вещества при 20° С (с введением отвердителей) или при 70—90° С (без введения отвердителей). В исходном состоянии компаунды МБК инертны по отношению к меди, устойчивы против растрескивания и обладают высокими влаго-, водостойкостью и механической прочностью. Компаунд МБК-1 в отвержденном состоянии образует твердую неэластичную аморфную массу, а компаунды МБК-2 и МБК-3 образуют твердые эластичные массы.

Компаунды МБК в жидком состоянии разрушают резиновые материалы, поэтому последние не могут применяться при заливке этими компаундами.

⁸ Теплостойкость по Мартенсу отвержденного компаунда 70° С. Нагревостойкость 120° С.

⁹ Эпоксидно-полиэфирные компаунды с кварцевым наполнителем. Плотность 1700—1800 кг/м³. Водопоглощаемость за 10 суток при 20° С 0,094—0,090%. Диэлектрическая проницаемость отвержденного компаунда 5—6; ударная вязкость отвержденного компаунда 4—6 кДж/м². Заливку компаунда производят в предварительно нагретые стальные формы, смазанные кремнийорганической смазкой К-10. Отверждение компаунда происходит в течение 20—32 ч при 120° С в зависимости от габаритов заливаемых компаундом изделий.

¹⁰ Нагревостойкость 120° С (класс нагревостойкости Е). Компаунд К-168 отверждается (при 20° С) в течение 18—24 ч; «срок жизни» приготовленного компаунда 25—40 мин. Отвержденный компаунд стоек к воде и грибковой плесени и обладает высокой механической прочностью.

¹¹ Нагревостойкость 120° С (класс нагревостойкости Е). Компаунд К-293 отверждается при 120° С в течение 2 ч. «Срок жизни» подготовленного к заливке компаунда находится в пределах 30—240 мин. В отвержденном состоянии компаунд обладает высокой стойкостью к воде и грибковой плесени и имеет высокую механическую прочность.

¹² Холодостойкость —40° С в толстом слое (30—50 мм), в тонких же слоях (на медных пластинках) —60° С.

¹³ Температура каплепадения (по Уббеллоде).

¹⁴ Компаунд холодной заливки КХЗ-158 получается в результате смешения двух исходных составов: первый состоит из канифоли, битума и какого-либо разбавителя (трансформаторное масло), второй включает в себя окись кальция, разбавитель и гидроокись кальция. Окись кальция вводится для связывания воды, выделяющейся в процессе реакции. Битум применяется с температурой размягчения 80—70° С (по Кремер—Сарнову). Компаунд КХЗ-158 отверждается в течение 2—6 ч с момента смешения двух исходных составов (100 частей первого состава и 32 части второго состава).

9-8. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЛАКОТКАНИ

Таблица 9-10

Основные характеристики электроизоляционных лакокотканей

Марка лакокоткани	Основа лакокоткани	Пропиточный состав	Номинальная толщина, мм	Предел прочности при растяжении, Н/см (по основе)	ρ_{20} , Ом·м, (не менее)	$U_{пр}$, кВ (не менее)		Нагревостойкость, °С	Цена 1 м (при ширине 0,7—0,9 м)
						при 15—40° С и относительной влажности 45—78%	после 24 ч пребывания во влажной атмосфере		
ЛХМ-105	Хлопчатобумажная	Масляный лак	0,15; 0,17; 0,24; 0,30	38—45	10 ¹¹	4—9,5	1,6—4,8	До 105° С	1 р. 45 к.
ЛХМС-105	То же	То же	0,17; 0,20	44—51	10 ¹¹	4,5—7,6	2,1—4,1	До 105° С	1 р. 75 к.
ЛХММ ⁸ -105	» »	» »	0,17; 0,20; 0,24	50—64	10 ¹¹	4,8—9,2	2,0—4,2	До 105° С	1 р. 80 к.
ЛХБ-105	» »	Битумно-масляный лак	0,17; 0,20; 0,24	58—80	10 ¹¹	4,5—9,2	2,0—3,6	До 105° С	1 р. 80 к.
ЛЦМ-105	Шелковая	Масляный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15	7—24	10 ¹¹	1,0—8,5	1,4—3,8	До 105° С	4 р. 40 к.
ЛЦМС-105	То же	То же	Той же толщины	9—25	10 ¹²	1,0—9,3	2,0—4,2	До 105° С	4 р. 35 к.
ЛКМ-105	Капроновый шелк	» »	0,10; 0,12; 0,15	20—30	10 ¹¹	3,3—7,8	1,7—4,2	До 105° С	4 р. 00 к.
ЛКМС-105	То же	» »	Той же толщины	20—30	10 ¹²	3,6—9,3	2,0—4,2	До 105° С	4 р. 15 к.
ЛСМ-105/120	Стекло-ная	» »	0,15; 0,17; 0,20; 0,24	85—165	10 ¹¹	3,2—8,0	1,5—4,2	До 120° С	70 к.
ЛСММ ⁸ -105/120	То же	» »	0,17; 0,20; 0,24	95—170	10 ¹¹	4,0—9,2	2,3—4,6	До 120° С	90 к.
ЛСЛ-105/120	» »	Бутадиен-стирольный латекс	0,15; 0,17; 0,20; 0,24	95—170	10 ¹²	3,2—8,4	1,3—3,5	До 120° С	50 к.
ЛЭС-105/130	» »	Состав на основе синтетического каучука	0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,24	70—170	10 ¹²	2,6—9,6	0,7—3,6	До 130° С	54 к.
ЛСБ-120/130	» »	Битумно-масляноалкидный лак	Те же толщины	70—170	10 ¹²	2,6—10	0,9—4,1	До 130° С	90 к.
ЛСП-130/155	» »	Полиэфирно-эпоксидный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15; 0,17	35—130	10 ¹⁰	0,8—9,0	0,6—3,5	До 155° С	1 р. 15 к.
ЛСК-155/180	» »	Кремний-органический лак	0,06; 0,08; 0,12; 0,15; 0,17; 0,20	35—150	10 ¹²	1,2—9,0	0,8—5,0	До 180° С	От 1 р. 25 к. до 2 р. 20 к.
ЛСК-2	» »	Кремний-органическая эмаль	0,12; 0,15; 0,20	50—120	10 ¹¹	2,5—7,5	1,3—4,2	До 180° С	1 р. 60 к.
ЛСКР-180	» »	Состав на основе кремнийорганического каучука	Той же толщины	50—120	10 ¹²	0,7—4,9	0,6—2,7	До 180° С	2 р. 70 к.
ЛСТР ⁸	» »	Термореактивный состав	0,16; 0,18; 0,20	60—110	10 ¹¹	3,0—6,0	—	До 155° С	12 р. 00 к. за 1 кг
ЛСП-К	» »	Полиэфирно-эпоксидный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15; 0,17	35—130	10 ¹⁰	1,2—9,0	0,6—3,6	До 155° С	1 р. 20 к.
ЛСК-5	» »	Полупроводящая кремнийорганическая эмаль	0,12; 0,15; 0,20	48—122	Не более 10 ⁸	—	—	До 180° С	2 р. 00 к.

¹ Значения пробивных напряжений получены при электродах диаметром 6 мм.² Меньшие значения пробивного напряжения относятся к ослабленным местам в образцах лакокотканей наименьшей толщины.⁸ ЛХММ — хлопчатобумажная маслостойкая; ЛСММ — маслостойкая стекланная; ЛСТР — липкая стеклоткань.

9-9. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ НАМОТАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Таблица 9-11

Размеры намотанных электроизоляционных изделий

Классификация по основе	Наименование и марка изделия	Основные размеры, мм					
		Внутренний диаметр	Промежуточные значения внутреннего диаметра (кратные)	Толщина стенки	Длина	Промежуточные значения длины (кратные)	Цена за 1 кг
Бумажно-бакелитовые	Трубки ТБ	6—30	8; 10; 12; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 24; 25; 26; 23; 30 ¹	1,5—10	200—1000	5	2 р. 40 к.— 3 р. 00 к.
	Цилиндры ЦБ	105—500 510—1200	5 10	2,0—20 4—25	1010—2200 То же	10 То же	1 р. 60 к. 1 р. 80 к.]
	Трубки ТБ/п	10÷8	2 и 5	1,5—10	200—800	5	
Текстолитовые на бакелитовом связующем	Трубки ТХ	10—80	2 или 5	2,5—10	630	—	13 р.
	Цилиндры ЦХ1, ЦХ2	85—400	2 или 5	4—20	630 и 830	—	9—11 р. (ЦХ1); 4 р. 30 к. (ЦХ2)
	Стержни	Наружный диаметр 8—60	8; 13; 18; 25; 40; 50; 60 ¹	—	200; 350; 500 и 550	—	3—4 р.
Стеклотекстолитовые на эпоксидном связующем	Трубки ТСЭ	10—20	2 или 5	2—5	650; 750	—	8 р. 50 к. 10 р. 50 к.
	Цилиндры ЦСЭ	22—80 85—400 410—600	2 или 5 5 10	2—10 3—20 4—20	650; 750 650; 750 и 850	— — —	5 р.
	Цилиндры ЦСЭВ ²	90—140	5	10—20	275—840	40	6 р.
	Трубки ТСК	10—80	2 или 5	2—6	650	—	12 р.—15 р.
Стеклотекстолитовые на кремнийорганическом связующем	Цилиндры ЦСК	От 85 до 400	5	4—10	650; 750; 850	—	12 р.

¹ Это промежуточные значения наружного диаметра стержней.² Цилиндры для малообъемных масляных выключателей.

Таблица 9-12

Основные характеристики намотанных электроизоляционных изделий

Классификация по основе ¹	Наименование изделия	Марка	Физико-механические характеристики				Электрические характеристики при 20° С		
			Плотность, кг/м³	Предел прочности		Водопоглощаемость, %	ρ _V , Ом·м	tg δ при 50 Гц	E _{пр} , МВ/м
				при изгибе, МПа	при сжатии вдоль оси, МПа				
Бумажно-бакелитовые	Трубки	ТБ	1050—1100	80—95	40—50	3,5—4,5	10 ⁸ —10 ¹⁰	0,02—0,03	8—12
		ТБ-П	1050—1100	80—95	40—50	3,5—4,5	10 ⁸ —10 ¹⁰	0,008—0,03	8—16
	Цилиндры	ЦБ	1050—1100	—	—	2,5—4,0	10 ⁸ —10 ¹⁰	0,01—0,03	8—14

Продолжение табл. 9-12

Классификация по основе	Наименование изделия	Марка	Физико-механические характеристики				Электрические характеристики при 20° С		
			Плотность, кг/м³	Предел прочности		Водопоглощаемость, %	ρ_V , Ом·м	$\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц	$E_{\text{пр}}$, МВ/м
				при изгибе, МПа	при сжатии вдоль оси, МПа				
Текстолитовые на бакелитовом связующем	Трубки	ТХ	1050—1100	80—90	45—55	2,5—5,0	10^8 — 10^{10}	0,02—0,05	6—10
	Цилиндры	ЦХ1; ЦХ2	1050—1100	80—90	45—55	1,5—4,0	10^8 — 10^{10}	0,01—0,04	8—12
	Стержни	—	1250—1400	98—118	40—98 ²	0,8—0,9	10^8 — 10^9	—	8—9 ³
Стеклотекстолитовые на эпоксидном связующем	Трубки	ТСЭ	1400	180	70	0,8—0,9	10^{10} — 10^{11}	0,02—0,03	2,4—4,5
	Цилиндры	ЦСЭ	1400	—	—	—	10^{10} — 10^{11}	0,03—0,04	2,4—4,6
		ЦСЭВ	1500	—	70	—	10^{10} — 10^{11}	0,015—0,02	22—37
Стеклотекстолитовые нагревостойкие	Трубки	ТСК	1300—1400	—	35—45	0,6—0,9	10^{10} — 10^{12}	0,02—0,03	3—4
	Цилиндры	ЦСК	1300—1400	—	35—45	0,6—0,8	10^{10} — 10^{12}	0,02—0,03	2—5

¹ По нагревостойкости бумажно-бакелитовые и текстолитовые изделия относятся к классу А (до 105° С). Стеклотекстолитовые изделия на эпоксидном связующем относятся к классу F (до 155° С); стеклотекстолитовые изделия нагревостойкие на кремнийорганическом связующем — к классу Н (до 180° С).

² Текстолитовые стержни испытывают на растяжение ($\sigma_p = 40 \div 95$ МПа). Большие значения предела прочности при растяжении относятся к изделиям диаметром 8 мм.

³ У текстолитовых стержней определяется электрическая прочность в направлении, параллельном слоям.

9-10. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЛЮДЫ

Таблица 9-13

Основные характеристики клееных электроизоляционных материалов на основе натуральной слюды

Материал	Марка материала	Толщина, мм	Электрические параметры при 20° С			Области применения	Цена за 1 кг
			ρ_V , Ом·м	$\operatorname{tg} \delta$	$E_{\text{пр}}$, МВ/м		
Миканит коллекторный	КФШ; КФГ	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5	10^{10} — 10^{12}	0,01—0,03	18—20	Твердые электроизоляционные прокладки между коллекторными пластинами в электрических машинах	18—23 р.
	КФГС	0,4; 0,5; 0,6			18—22		21—27 р.
Миканит коллекторный на аммофосе	КФА	0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2	10^8 — 10^{11}	0,008—0,01	18—25	То же, но в электрических машинах нагревостойкого исполнения	17—33 р.
Миканит прокладочный	ПМГ; ПМГА; ПФГ; ПФГА; ПСГ; ПСГА	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 5,0	10^{10} — 10^{11}	0,03—0,05	15—24	Твердые электроизоляционные прокладки и шайбы в электрических машинах и аппаратах	4 р.—7 р. 50 к.

Продолжение табл. 9-13

Материал	Марка материала	Толщина, мм	Электрические параметры при 20° С			Области применения	Цена за 1 кг
			ρ_V , Ом·м	$\operatorname{tg} \delta$	$E_{\text{пр}}$, МВ/м		
Миканит прокладочный	ПМШ; ПМША; ПФШ; ПФША; ПСП; ПСПА	Те же размеры	$10^{10}-10^{11}$	0,05—0,07	15—24	Твердые электроизоляционные прокладки и шайбы в электрических машинах и аппаратах То же, но нагревостойкого исполнения	20—68 р.
	ПФКА	0,15 и те же размеры	$10^{10}-10^{11}$	0,03—0,05	18—35		
Миканит формовочный прессованный	ФМГ; ФМГА; ФФГ; ФФГА; ФСГ; ФСГА	0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5 и более	10^9-10^{10}	—	22—38	Электроизоляционные изделия фасонного профиля (конусы, цилиндры, манжеты коллекторные и др.), получаемые горячим прессованием из заготовок формовочного миканита	26—92 р.
	ФМШ; ФМША; ФФШ; ФФША; ФСП; ФСПА	Те же размеры	10^9-10^{11}	—	22—38		41—88 р.
	ФМК; ФФК; ФФКА	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50	10^9-10^{10}	—	27—39	То же, но нагревостойкого исполнения	
Миканит гибкий	ГМС; ГМЧ; ГФС; ГФЧ; ГФК	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50	10^9-10^{10}	0,03—0,07	22—29	Пазовая и витковая изоляция, а также гибкие электроизоляционные прокладки в электрических машинах.	22—80 р.
	ГМСО; ГМЧО; ГФСО; ГФЧО	0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50	10^9-10^{10}	0,05—0,08	15—21	Нагревостойкость 130 и 180° С (ГФК)	
Стекло-миканит гибкий	Г ₁ ФКГ; Г ₁ ФГ	0,20; 0,30; 0,50	10^9-10^{10}	0,04	9—17	То же, но с повышенной нагревостойкостью (класс В—на глифталевом лаке и класс Н—на кремнийорганическом лаке)	18—42 р.
	Г ₂ ФКГ; Г ₂ ФЭГ	0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60	10^9-10^{10}	0,06	8—12		17—32 р.
	Г ₂ ФКШ; Г ₂ ФГШ	Те же, исключая 0,20	10^9-10^{10}	0,05	8—15	То же, но обладает повышенной механической прочностью	18—35 р.
Микафоллий	МФП-Т; МФП-С; МФК-Т; МФК-С	0,20; 0,25; 0,30	10^9-10^{11}	—	13—15	Пазовая и межвитковая изоляция статорных и роторных обмоток электрических машин высокого напряжения (гиляза, трубки, прокладки и другие фасонные изделия)	14—62 р.
	МФГ-Т; ММГ-Т;	0,15; 0,20; 0,30	10^9-10^{11}	—	8—16		
	МФГ-С; ММГ-С; ММК-С; ММК-Т	0,20; 0,25; 0,30	10^9-10^{11}	—	6—16		
	МФГ-Б; МФШ-Б; ММГ-Б; ММШ-Б	Те же размеры	10^9-10^{11}	—	5—13 7—16		

Продолжение табл. 9-13

Материал	Марка материала	Толщина, мм	Электрические параметры при 20° С			Области применения	Цена за 1 кг
			ρ_v , Ом·м	$\operatorname{tg} \delta$	E_{np} , МВ/м		
Микашелк	ЛСМШБ; ЛСФСБ; ЛЧМШБ; ЛЧФСБ	0,14; 0,17	10^{10} — 10^{12}	—	12—15	Изоляция секций и лобовых частей обмоток	22—35 р.
Микалента	ЛФЧ-Б	0,08	10^{10} — 10^{11}	0,03—0,05	18—21	Гибкий при комнатной температуре материал, выпускаемый в рулонах шириной 10; 15; 20; 23; 25; 30 и 35 мм. Нагревостойкость класса В (130° С). Применяется для изоляции стержней и секций обмоток в электрических машинах высокого напряжения	60—86 р.
	ЛФЧ-ББ	0,10; 0,13; 0,17	10^{10} — 10^{11}	0,03—0,06	12—20		
	ЛМЧ-ББ	Те же толщины					
	ЛФС-ББ	0,10; 0,13; 0,17	10^{10} — 10^{11}	0,02—0,05	16—20		
	ЛМС-ББ	Те же размеры					
	ЛМС-ТВ	0,15; 0,17	10^{10} — 10^{11}	0,03—0,05	12—15		
	ЛМЧ-ТВ	0,15; 0,17					
	ЛФС-ТВ	0,10; 0,13; 0,15; 0,17	10^{10} — 10^{11}	0,02—0,05	12—15		
	ЛФС-ТТ	Те же размеры и 0,20			12—13		
Стекломикалента	ЛФК-Т	0,08; 0,13; 0,15	10^{11} — 10^{12}	0,01—0,03	12—16	Гибкий при комнатной температуре материал, выпускаемый в рулонах шириной 10; 15; 20; 25; 30 и 35 мм. Применяется для изоляции стержней и секций обмоток в электрических машинах высокого напряжения. Нагревостойкость класса Н (180° С)	32—72 р.
	ЛФК-ТТ	0,1; 0,13; 0,15; 0,17; 0,20	10^{11} — 10^{12}	0,02—0,03	9—15		
	ЛФК-ТС	0,1; 0,13; 0,15; 0,17; 0,21			9—15		
	ЛМК-ТТ	0,13; 0,15			12—14		
	ЛМК-ТС	0,13; 0,15			12—14		
	ЛМР-СС	0,13	10^{10} — 10^{11}	0,03—0,05	12—13	Те же, но нагревостойкость В (130° С)	17—75 р.
	ЛФС-ТТ	0,1; 0,13; 0,15; 0,17; 0,20	10^{10} — 10^{11}	0,03—0,05	9—14		
	ЛФЭ-Т	0,08; 0,10	10^{10} — 10^{12}	0,03—0,05	13—17	То же, но нагревостойкость F (155° С)	
	ЛФЭ-ТТ	0,13; 0,15; 0,17; 0,20	10^{10} — 10^{12}	0,03—0,05	9—14		
	Микалекс	—	4; 5; 6; 8; 10; 12; 15 и более	10^{10} — 10^{12}	0,002—0,004 (при $f=10^5$ Гц)	13—18	Твердый дугостойкий материал на основе молотой слюды и стекла. Выпускается в виде листов и прутков. Нагревостойкость 350° С

Примечание. О ценах на слюдяные материалы см. Прейскурант № 15-10, ч. I, 1974 г.

Таблица 9-14

Основные характеристики слюдинитовых электроизоляционных материалов

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические характеристики при 20° С		Области применения	Цена за 1 кг
			ρ_v , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м		
Слюдинит коллекторный	КСШ	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2	10^{10} — 10^{12}	20—25	Электроизоляционные прокладки между пластинами в коллекторах электрических машин; нагревостойкость класса В	9 р.
Слюдинит прокладочный	ПСШ; ПСК; ПСЭ; ПСТ	0,4; 0,6; 0,7; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0	10^{10} — 10^{11}	18—22 9—22	Электроизоляционные прокладки в электрических машинах и аппаратах. Пазовая изоляция в электрических машинах; нагревостойкость класса В	7 р.
Слюдинит гибкий	Г ₁ СП; Г ₂ СП;	0,10; 0,15; 0,15; 0,2; 0,25	10^{10} — 10^{11}	18—20	То же, но нагревостойкость класса Н	10—28 р.
	ГСП	{ 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5	10^{10} — 10^{11}	16—26		
	Г ₁ СК; Г ₂ СК	0,10; 0,15 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5	10^{10} — 10^{11}	20—28		
	ГСП	{ 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5	10^{10} — 10^{11}	20—28		
Стеклослюдинит гибкий, нагревостойкий	ГС25КН ГС40КН	0,10; 0,12 0,10; 0,15	10^{10} — 10^{11}	20—27	То же, но нагревостойкость до 250° С	18—32 р.
	ГС25КН; ФС40КН	0,10; 0,12 0,10; 0,15; 0,20	10^{11} — 10^{12}	25—32		
Стеклослюдинит формовочный нагревостойкий	ФС25КН; ФС40КН	0,10; 0,12 0,10; 0,15; 0,20	10^{11} — 10^{12}	25—32	Пазовая изоляция и прокладки в электрических машинах и аппаратах нагревостойкого исполнения	15—25 р.
Слюдинито-фольи	СССП	0,10; 0,12; 0,15	10^{10} — 10^{11}	5—12	Формуемый в нагретом состоянии материал. Применяется для пазовой изоляции	7 р.
Слюдинитовая лента	ЛСК-С; ЛСК-Т; ЛСК-СС; ЛСК-ТТ	0,11 0,11 0,15; 0,17 0,15; 0,17	10^{10} — 10^{12} 10^{10} — 10^{12}	10—14 6—10	Гибкий (при комнатной температуре) материал, поставляемый в рулонах шириной: 10, 15, 20, 23, 25, 30, 35 мм Применяется в тех же областях, что и микалента из щепаной слюды; нагревостойкость 180—200° С	10—22 р.
	ЛСК-С; ЛСК-Т; ЛСК-СС; ЛСК-ТТ	0,11 0,11 0,15; 0,17 0,15; 0,17	10^{10} — 10^{12} 10^{10} — 10^{12}	10—14 6—10		
Стеклослюдинитоэлектрокартон	ССК-П	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50	10^{11} — 10^{12}	15—22	Пазовая и междупазовая изоляция; нагревостойкость класса В	8 р.

Таблица 9-15

Основные характеристики слюдопластовых электроизоляционных материалов

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические характеристики при 20° С		Области применения	Цена за 1 кг
			ρ_v , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м		
Слюдапласт коллекторный	КИФС; КИФСС; КИФС-1	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2	10^{10} — 10^{11}	20—22	Прессованный и калиброванный по толщине листовой материал; нагревостойкость класса В	5 р. 80 к.
	КИФП	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5 и более	10^{10} — 10^{11}	20—25	То же. Применяется в виде электроизоляционных прокладок в коллекторах электрических машин; нагревостойкость класса F	7 р. 70 к.
	КИФТС; КИФТ	0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5 и более	10^{11} — 10^{12}	20—28	То же, но нагревостойкость класса С	9 р. 20 к.
Слюдапласт прокладочный	ПИФС	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9	10^{11} — 10^{12}	18—20	Прессованный листовой материал, применяемый в виде электроизоляционных прокладок; нагревостойкость класса В	4 р. 70 к.
	ПИФША	1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 5,0				
	ПИФТ	Те же, но исключая 3,0; 5,0	10^{11} — 10^{12}	18—20	То же, но нагревостойкость класса С	6 р. 20 к.
Слюдапласт гибкий	ГИФГ	0,2; 0,4; 0,3; 0,5	10^{12} — 10^{14}	18—25	Изоляция роторных стержней, пазовая и междупазовая изоляция; нагревостойкость класса В	10 р. 80 к.
Стеклослодопласт гибкий	ГИТ-ТС; ГИТ-СС; ГИП-ТС; ГИП-СС	0,3; 0,35; 0,40; 0,45; 0,25	10^{10} — 10^{11}	12—18	Гибкий электроизоляционный материал с повышенной механической прочностью; нагревостойкость класса В	7—10 р.
	ГИК-ТС; ГИК-СС	Те же размеры	10^{11} — 10^{12}	12—18	То же, но нагревостойкость класса С	10—13 р.
Слюдапласто- фоллий	ИФГ; ИФГ-В; ИФГ-П; ИФГ-БП	0,15; 0,20; 0,30 Те же размеры	10^{10} — 10^{11}	20—22	Рулонный и листовой материал, легко формующийся в нагретом состоянии; нагревостойкость класса В. Применяется для изоляции роторных стержней в электрических машинах невлагостойкого исполнения	7—9 р.
Слюдапласто- лента	ЛИФЧ-ББ	0,11; 0,13; 0,15; 0,17	10^{10} — 10^{12}	16—24	Гибкий в холодном состоянии рулонный материал, выпускаемый в роликах шириной 12, 15, 17, 24, 30, 35 мм. Применяется в качестве втулочной и корпусной (совместно с микален-той) изоляции электрических машин	7 р. 30 к.

Продолжение табл. 9-15

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические характеристики при 20°С		Области применения	Цена за 1 кг
			ρ_V , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м		
Стеклослод- опласт композици- онный	ГИТ-ТС; ГИП-СС ГИП-ТС; ГИП-ТС (В); ГИП-СС; ГИП-СС (В)	0,25; 0,30 0,35; 0,40 0,45	10 ¹⁰ —10 ¹²	18—24	Листовой материал, со- стоящий из двух слоев сло- допластовый бумага, слоя стеклоткани и слоя стекло- сетки, нагревостойкость классов В и F (ГИП-Т, ГИП-С) применяется для пазовой и другой изоляции электрических машин	9—13 р.
	ГИК-ТС; ГИК-СС; ГИК-ТС (В); ГИК-СС (В)	0,40; 0,45 0,35	10 ¹¹ —10 ¹²	18—24	То же, но нагревостой- кость класса Н	

9-11. ЭЛЕКТРОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 9-16

Основные характеристики изоляториых электрокерамических материалов

Материал	Плотность, кг/м³	Механические харак- теристики¹				Электрические характеристики при 20°С			
		Предел прочно- сти при растя- жении, МПа	Предел прочно- сти при статиче- ском изгибе, МПа	Ударная вяз- кость, кДж/м²	ТК² линей- ного расши- рения, °С—1	ρ_V , Ом·м	ϵ_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м
Электрофар- фор	2200	30—55	60—110	1,8—2,2	(3,5—5,0)·10 ⁻⁶	10 ¹¹ —10 ¹²	5—8	0,022—0,025	30—32
Ультратфарфор УФ-46 и УФ-53	3200	50—60	200—250	2,5—2,8	(5,0—5,5)·10 ⁻⁶	10 ¹² —12 ¹³	8,0—8,8	0,0005—0,001	30—36
Стеатит³ СК-4, ТК-21	3000	60—70	170—190	3,0—3,5	(6,0—6,4)·10 ⁻⁶	10 ¹³ —10 ¹⁴	6,5—7,0	0,001—0,003	40—42
Кордиерит⁴	2800	—	70—88	2,0—3,0	(2,0—2,3)·10 ⁻⁶	10 ⁹ —10 ¹⁰	5—6	—	4,5—6,0

¹ Приведенные значения механических характеристик относятся к неглазурованным образцам. У образцов фарфора и стеатита, покрытых глазурью, значения механических характеристик превышают приведенные в среднем на 15—20% (при правильно подобранных глазурях).

² Значения ТК расширения даны для интервала температур 20—100°С.

³ Стеатиты по сравнению с фарфорами и кордиеритом обладают меньшей стойкостью к рез-
кой смене температур, т. е. менее термостойки.

⁴ Кордиеритовая керамика обладает заметным водопоглощением (7—11%), но отличается боль-
шой стойкостью к электрическим дугам и находит главное применение в электрических аппа-
ратах.

Список литературы

9-1. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. — Л.: Энергия, 1977. — 352 с.

9-2. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В. Материалы радиоэлектронной техники. — М.: Высшая школа, 1969. — 423 с.

9-3. Технология производства электроизоляци-
онных материалов и изделий/О. В. Бобылев,
Н. В. Никулин, Л. В. Русаков, В. И. Цыганов.—
М.: Энергия, 1977. — 432 с.

9-4. Готман П. Е., Березин В. Б., Хай-
кин А. М. Электротехнические материалы (спра-
вочник). — М.: Энергия, 1969. — 544 с.

9-5. Дроздов Н. Г., Никулин Н. В. Электро-

материаловедение. — М.: Высшая школа, 1973. —
310 с.

9-6. Корицкий Ю. В. Электротехнические ма-
териалы. — М.: Энергия, 1976. — 320 с.

9-7. Сажин Б. И. и др. Электрические свой-
ства полимеров. — Л.: Химия, 1977. — 192 с.

9-8. Электрорадиоматериалы/Б. М. Тареев,
Н. В. Короткова, В. М. Петров, А. А. Преобра-
женский. — М.: Высшая школа, 1978. — 380 с.

9-9. Электротехнические материалы. Справоч-
ник/Под ред. Ю. В. Корицкого, Б. В. Пасынко-
ва, Б. М. Тареева. М.: Энергия, т. 1, 1974. — 584 с.;
т. 2, 1974. — 616 с.

9-10. Яманов С. А. Химия и радиоматериа-
лы. — М.: Высшая школа. 1970. — 400 с.

9-11. ГОСТ 21515-76. Материалы диэлектриче-
ские. Термины и определения.

Раздел 10

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

10-1. Общие сведения	316	ковых материалов и методы их изме-	316
10-2. Получение полупроводниковых материалов	316	10-4. Электрофизические параметры полу-	319
10-3. Основные параметры полупроводни-		проводников	325
		Список литературы	

10-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К классу полупроводников формально относятся вещества, удельная электрическая проводимость которых может принимать значения от 10^6 до 10^{-3} См/м (при $T = 300$ К). С точки зрения зонной теории вещества (см. § 3-1), в которых при $T = 0$ К верхняя из заполненных электронами энергетических зон (валентная зона) и нижняя из незаполненных электронами энергетических зон (зона проводимости) не перекрываются, являются полупроводниками или диэлектриками. Граница между ними весьма условна — в полупроводниках энергетический зазор (ширина запрещенной зоны) между зоной проводимости и валентной зоной не превосходит 2—3 эВ, что приводит к появлению в зонах заметного числа свободных носителей заряда (электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне) при $T > 0$ К (см. также § 3-1).

Для полупроводников характерна зависимость проводимости от внешних воздействий (температуры, электромагнитного излучения и видимого света, давления, деформации, электрических и магнитных полей, ионизирующего излучения) и от количества примесей, а также характерна нелинейность вольт-амперной характеристики контакта.

Полупроводники, как правило, являются кристаллическими веществами с различными кристаллическими решетками, причем они могут быть простыми (решетка образована из атомов одного химического элемента) или сложными (решетка образована из атомов двух или большего числа химических элементов). Сложный полупроводник может быть химическим соединением или сплавом.

Электронный полупроводник — полупроводник, электропроводность которого обусловлена в основном перемещением электронов.

Дырочный полупроводник — полупроводник, электропроводность которого обусловлена перемещением дырок проводимости.

10-2. ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Способов получения чистых и примесных полупроводниковых материалов очень много; наиболее совершенный и широко

применяемый способ очистки полупроводниковых материалов — способ «зонной плавки». При зонном плавлении слиток «грязного» полупроводника, полученный тем или иным способом, помещается в чистую графитовую лодочку, заключенную в кварцевую трубу; по этой трубе непрерывно проходит инертный газ, например аргон, который препятствует попаданию в трубу извне нежелательных примесей и воздуха. При помощи узкого кольцевого нагревателя добиваются плавления небольшой части слитка и медленно перемещают расплавленную зону вдоль него. На границе твердой и жидкой фаз большинство примесей диффундирует из твердой фазы в жидкую за счет большей растворимости в жидкой фазе и уносятся расплавленной зоной к концу слитка. При повторении этого процесса несколько раз получается очень чистый слиток, у которого отламывается грязный конец. После зонной плавки слиток поступает в дальнейшую плавку, где в него вводят необходимые примеси в нужных количествах. Наиболее распространенный метод «вытягивание монокристаллов из расплава», именуемый методом Чохральского, заключается в следующем. При медленном вытягивании затравки (кусочек монокристалла данного полупроводника) из расплава, который также находится в инертном газе, расплавленный полупроводник постепенно выкристаллизуется на ее поверхности, образуя при этом монокристалл. В процессе вытягивания кристалла из расплава для достижения однородности растущего кристалла и равномерного перемешивания введенных в расплав примесей часто дают затравке и тиглю с расплавом вращательное движение в разные стороны, причем устанавливается очень точный контроль температуры расплава. После того как монокристалл вытянут из расплава, ему дают постепенно остыть, затем проверяют его электрические параметры.

10-3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Электрическая проводимость. Одним из важнейших параметров полупроводников является их удельная проводимость, характеризующая степень чистоты материала.

Проводимость полупроводников зависит от концентрации свободных носителей заряда (электронов или дырок) при данной температуре и их подвижности. В общем случае

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e(n\mu_n + p\mu_p),$$

где σ — удельная проводимость при данной температуре; ρ — удельное сопротивление; n, p — концентрация свободных носителей;

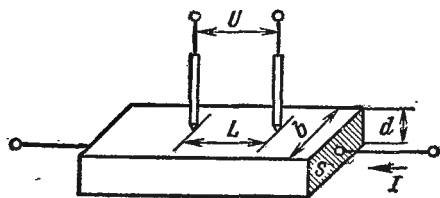


Рис. 10-1. Измерение удельного сопротивления двухзондовым методом.

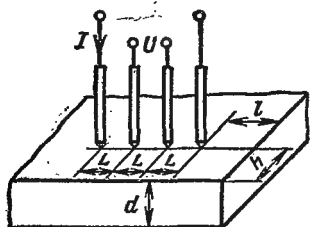


Рис. 10-2. Измерение удельного сопротивления четырехзондовым методом.

μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок при данной температуре.

В настоящее время имеется много методов измерения удельного сопротивления: двухзондовый, трехзондовый, четырехзондовый, бесконтактный и др. Наибольшее распространение получили двухзондовый и четырехзондовый методы.

Двухзондовый метод применяется для измерения удельного сопротивления образцов, имеющих правильную геометрическую форму с известным поперечным сечением (рис. 10-1). Через торцовые грани образца с нанесенными на них омическими контактами пропускается электрический ток. На поверхности образца вдоль линии тока располагаются два металлических зонда на расстоянии L друг от друга и измеряется разность потенциалов U между ними.

Удельное сопротивление образцов вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{US}{IL} = \frac{Ud}{IL}.$$

Для исключения падения напряжения на контактных сопротивлениях зондов разность потенциалов U измеряется либо по-

тенсиометром, либо вольтметром с большим входным сопротивлением.

Четырехзондовый метод, обладая высокими метрологическими показателями и простой конструкцией, получил наиболее широкое применение. Он позволяет измерять удельное сопротивление не только объемных монокристаллов, но и тонких диффузионных и эпитаксиальных слоев полупроводника. Принцип четырехзондового метода показан на рис. 10-2. На поверхности полупроводника помещаются четыре зонда, расположенные на одной линии на равном расстоянии L друг от друга; через крайние зонды пропускают электрический ток I , а

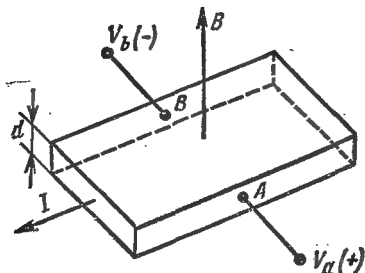


Рис. 10-3. Поперечное поле, обусловленное эффектом Холла.

между двумя внутренними зондами измеряется разность потенциалов U .

Для полубесконечного образца, когда $d, l, h \gg L$, удельное сопротивление вычисляется по формуле

$$\rho = 2\pi LU/I.$$

При измерении образцов полупроводника с размерами d, l, h , сопоставимыми с межзондовым расстоянием L , вводится поправочный множитель F , который зависит от граничных условий измерения. Значения этого множителя приводятся в специальной литературе [10-1]. В этом случае удельное сопротивление

$$\rho = F \cdot 2\pi LU/I.$$

Концентрация и подвижность. Определение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках производится с помощью эффекта Холла, сущность которого в следующем. Если поместить однородный прямоугольный образец полупроводника в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока, протекающему по образцу, то на боковых гранях возникает поперечная разность потенциала, называемая ЭДС Холла (рис. 10-3)

$$V_a - V_b = RIB/d,$$

откуда

$$R = (V_a - V_b) d / IB,$$

где $V_a - V_b$ — холловская разность потенциала; R — коэффициент Холла; I — ток через образец; B — магнитная индукция;

d — толщина пластинки в направлении магнитного поля.

В общем виде коэффициент Холла определяется выражением

$$R = \frac{1}{e} \frac{-n\mu_n^2 + p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2} = \frac{-nb^2 + p}{(nb + p)^2 e},$$

где b — отношение подвижностей.

В частных случаях для резко выраженных типов полупроводников коэффициент Холла равен:

$$R = 1/ne \text{ или } 1/pe.$$

Эффект Холла позволяет определять тип проводимости полупроводника (по знаку возникающей между точками A и B разности потенциала), концентрацию и подвижность носителей заряда при совместном измерении проводимости образца. Для полупроводника резко выраженного типа подвижность

$$\mu = \sigma R.$$

Для определения в полупроводниках концентрации носителей заряда в лабораторной и производственной практике используется ряд методов [10-1, 10-2]: метод вольт-фарадных характеристик барьера Шоттки, метод плазменного резонанса, по оптическому поглощению, по эффекту Фарадея и др.

Концентрации донорных и акцепторных примесей, энергия их ионизации, ширина запрещенной зоны. Для характеристики относительной чистоты полупроводника вводится понятие — степень компенсации K , равная для полупроводника n -типа

$$K = N_a/N_d,$$

где N_a , N_d — концентрации акцепторных и донорных примесей.

Концентрации могут быть определены на основе измерения температурной зависимости концентрации и подвижности свободных носителей заряда по эффекту Холла [10-1—10-3].

В соответствии с законом действующих масс зависимость концентрации электронов дырок от температуры дается следующими соотношениями:

$$\frac{n(N_a + n)}{N_d - N_a - n} = \frac{1}{\gamma_d} 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2} \times \\ \times \exp \left(-\frac{W_p}{kT} \right) = K_d;$$

для дырочного полупроводника

$$\frac{p(N_d + p)}{N_a - N_d - p} = \frac{1}{\gamma_a} 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2} \times \\ \times \exp \left(-\frac{W_d}{kT} \right) = K_a,$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; K_d , K_a — константы

равновесия; γ_d , γ_a — факторы вырождения донорного и акцепторного уровней; W_d , W_a — энергии активации донорной и акцепторной примеси.

Экспериментально полученные зависимости концентраций n и p от температуры сопоставляются с последними соотношениями. С помощью ЭВМ подбором параметров γ_a , γ_d , N_a , N_d , W_a , W_d добиваются наилучшего соответствия теоретической и экспериментальной кривых.

Исследуя температурную зависимость концентрации в области собственной проводимости, можно определить ширину запрещенной зоны ΔW (см. § 3-1).

Время жизни. При расчете и конструировании различных полупроводниковых приборов всегда используется параметр — «время жизни» неосновных носителей заряда τ или диффузионная длина L_D , которые связаны между собой соотношением $L_D = \sqrt{D\tau}$, где D — коэффициент диффузии. Коэффициент диффузии и подвижность связаны соотношением Эйнштейна $D = kT\mu/e$ (в незарожденном полупроводнике).

Наиболее распространенный метод измерения времени жизни носителей заряда по изменению фотопроводимости кристалла во времени после прекращения действия света на полупроводник и определяется из следующего соотношения: $\sigma_f = \sigma_0 e^{-t/\tau}$, где σ_0 — удельная проводимость проводника в темноте;

σ_f — удельная проводимость полупроводника после прекращения освещения; t — время; τ — время жизни неосновных носителей заряда.

Кроме этого метода существует большое количество других методов определения диффузионной длины L_D и времени жизни неосновных носителей заряда, описанных в соответствующей литературе.

Поверхностная рекомбинация. Помимо рекомбинаций в объеме носители могут рекомбинировать на поверхности полупроводника. Скорость поверхностной рекомбинации S определяется как скорость потока частиц из объема к поверхности, необходимого для поддержания на ней избыточного числа неравновесных носителей заряда. Значение S сильно зависит от способа и качества обработки поверхности кристалла. Например, для германия она колеблется от 0,1 до 10^4 м/с.

Структура зон и эффективные массы. Эффективная масса носителя m^* характеризует его движение в кристаллической решетке. Обратная эффективная масса $(m^*)^{-1}$ — тензорная величина, определяемая зависимостью энергии носителя W от его волнового вектора k :

$$(m_{ij}^*)^{-1} = \frac{1}{\hbar^2} \left[\frac{\partial^2 W(k)}{\partial k_i \partial k_j} \right].$$

Прямой метод определения $W(k)$ и эффективных масс является циклотронный резонанс. Ценные сведения о зонной струк-

туре и эффективных массах дают измерения анизотропии магнитосопротивления, магнитооптических эффектов.

Качественные строения зон наиболее распространенных полупроводников приведены на рис. 10-4—10-8.

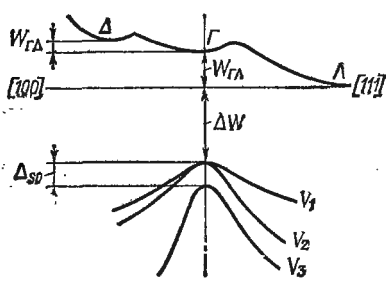


Рис. 10-4. Зонная структура германия.

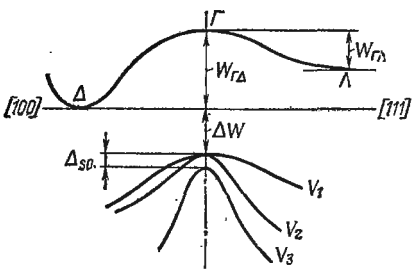


Рис. 10-5. Зонная структура кремния.

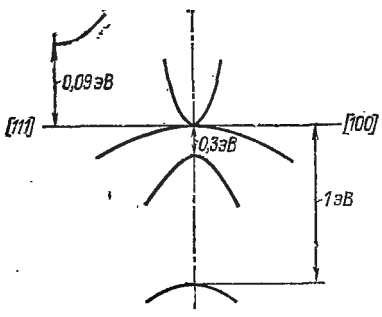


Рис. 10-6. Зонная структура α-Sn.

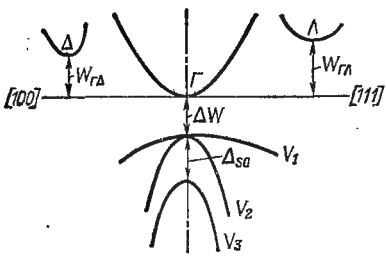


Рис. 10-7. Зонная структура InSb, InAs, InP, GaAs, GaSb.

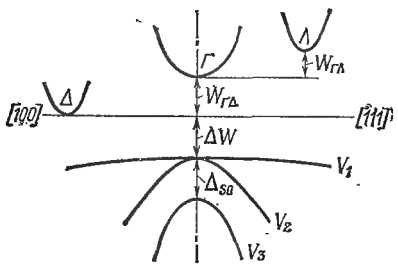


Рис. 10-8. Зонная структура GaP, AlSb, AlAs.

10-4. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Кремний и германий. Кремний и германий — наиболее изученные и широко используемые полупроводниковые материалы (табл. 10-1—10-3). Они относятся к IV группе таблицы Менделеева. Кристаллизуются в решетке типа алмаза. Имеют сложную зонную структуру (рис. 10-4, 10-5). В кремнии имеется шесть эквивалентных минимумов зоны проводимости, расположенных на осях [100] внутри зоны Бриллюэна, а в германии — восемь минимумов на осях [111], расположенных по краю зоны Бриллюэна. Вблизи этих минимумов изоэнергетические поверхности имеют вид эллипсоидов вращения с тензорной эффективной массой. Уравнение эллипсоида вращения для этих поверхностей имеет вид:

$$W(k) = \frac{\hbar^2}{2} \left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{m_{\perp}^*} + \frac{k_z^2}{m_{\parallel}^*} \right),$$

где $m_{\parallel}^*$ и $m_{\perp}^*$ — продольная и поперечная эффективные массы.

Большие полуоси эллипсоидов расположены в кремнии вдоль направлений [100], а в германии — вдоль [111]. В Si шесть эквивалентных эллипсоидов вращения, а в Ge — четыре полных эквивалентных эллипсоида (или восемь половинок эллипсоидов).

В кремнии и германии валентные зоны расщеплены на три подзоны V_1 , V_2 , V_3 , две из которых вырождены в точке $K=0$, а третья расщеплена спин-орбитальным взаимодействием на величину Δ_{so} . Зона V_1 называется зоной тяжелых дырок, а зона V_2 — легких дырок. Связь между энергией в первых двух подзонах $W_{1,2}$ с волновым вектором описывается уравнением вида

$$W_{1,2}(k) = W_0 - \frac{\hbar^2}{2m_0} \left[Ak^2 \pm \sqrt{B^2 k^4 + C^2 (k_x^2 k_y^2 + k_y^2 k_z^2 + k_z^2 k_x^2)} \right],$$

где W_0 — значение W при $K=0$; A , B , C — безразмерные коэффициенты; m_0 — масса свободного электрона. В сферической систе-

Таблица 10-1

Электрофизические параметры чистых германия и кремния

Параметр	Численные значения	
	Германий	Кремний
Кристаллическая структура, тип	Кубическая O_h^7	Кубическая O_h^7
Постоянная решетки a , мм	$0,565754 \pm 0,000001$ (300 K)	$0,543072 \pm 0,000001$ (300 K)
Плотность ρ , кг/м ³	$5322,4 \pm 2,5$ (300 K)	$2328,3 \pm 0,3$ (300 K)
Температура плавления $T_{пл}$, K	$1210 \pm 0,5$	1690 ± 4
Теплота плавления $\lambda_{пл}$, 10^4 Дж/кмоль	3290 ± 90	5000 ± 80
Теплота испарения $\lambda_{исп}$, 10^4 Дж/кмоль	$37\,190 \pm 900$	4400 ± 500
Удельная теплоемкость, c , Дж/(кг·°C)	$2,5 \cdot 10^4$ (300 K) $1,11 \cdot 10^4$ (80 K) $0,7$ (300 K) $1,0$ (200 K) $5,5$ (50 K) 11 (20 K) 10 (10 K) 353 (80 K) 406 (300 K)	$4,65 \cdot 10^4$ (300 K) $1,24 \cdot 10^4$ (80 K) $1,3$ (300 K) $2,5$ (200 K) 13 (50 K) 17 (20 K) $0,8$ (2K) 539 (80 K) 689 (300 K)
Теплопроводность λ , Вт/(м·°C)	$-0,07$ (40 K) $+1,05$ (80 K) $+2,20$ (100 K) $+5,75$ (300 K) $-0,1050 \cdot 10^{-6}$ (293 K)	$-0,05$ (40 K) $-0,77$ (80 K) $-0,31$ (100 K) $-2,33$ (300 K) $-0,111 \cdot 10^{-6}$ (290 K)
Температура Дебая T_D , K		
Температурный коэффициент линейного расширения α , 10^{-6} °C ⁻¹		
Относительная магнитная проницаемость μ_r		
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r	$16,3 \pm 0,2$ (290 K) $15,3 \pm 0,2$ (77 K и 1 МГц)	$11,7 \pm 0,2$ (290 K) $13,7$ (при 24 000)
Коэффициенты упругости 10^{10} Н/м ²		
k_{11}	$12,88$ (293 K), $13,16$ (78 K)	$16,56$ (293 K), $16,75$ (78 K)
k_{12}	$4,83$ (293 K), $4,94$ (78 K)	$6,39$ (293 K), $6,50$ (78 K)
k_{44}	$6,71$ (293 K), $6,84$ (78 K)	$7,95$ (293 K), $8,00$ (78 K)
Коэффициент преломления n	$4,01$ (300 K и $\lambda=0,589$ мкм)	$3,42$ (300 K и $\lambda=0,589$ мкм)
Работа выхода A , 10^{-19} Дж	$7,52 \pm 0,16$	$7,68 \pm 0,16$
Ширина запрещенной зоны	$0,774$ (0 K)	$1,15$ (0 K)
ΔW_0 , эВ;		
$W_{г\Delta}$	$0,05$	$2,3$
$W_{г\Delta}$	$0,15$	—
$W_{г\Delta}$	$0,02$	$1,5$
Δ_{so}	$0,28$	$0,035$
Δ_{so}	$0,30$	$0,044$
Температурное изменение ширины запрещенной зоны $d\Delta W_0/dT$, эВ/K	$-4 \cdot 10^{-4}$	$-4 \cdot 10^{-4}$
Изменение ширины запрещенной зоны от давления $d\Delta W_0/dp$, 10^{-10} эВ/Па	$0,5$	$-0,15$
Эффективная масса m^*/m_0		
для электронов $m_{ }$	$1,588$	$0,1905$
$m_{\perp}$	$0,0815$	$0,1905$
для дырок m_{p1}	$0,34$	$0,52$
m_{p2}	$0,043$	$0,16$
m_{p3}	$0,08$	$0,25$
эффективная масса электропроводности для электронов $m_{n\sigma}$	$0,12$	$0,26$
эффективная масса электропроводности для дырок $m_{p\sigma}$	$0,25$	$0,38$
эффективная масса плотности состояний электронов m_{dn}	$0,57$	$1,03$
эффективная масса плотности состояний дырок m_{dp}	$0,37$	$0,59$
Зонные параметры валентной зоны:		
A	$-13,27$	$-4,28$
B	$-8,63$	$-0,75$
C	$12,4$	$5,25$
Дрейфовая подвижность, 10^{-4} м ² /(В·с):		
электронов	3800 (T/300) $-1,66$	1300 (T/900) $-2,6$
дырок	1920 (T/300) $-2,33$	500 (T/300) $-2,3$
Пьезорезистивный коэффициент, 10^{-11} м ² /Н:	n -тип p -тип	n -тип p -тип
π_{44}	-138 $+97,5$	$-13,6$ $+138$
π_{12}	$-2,3$ $-3,7$	-102 $46,6$
π_{13}	$-3,2$ $+3,2$	$+53,5$ -11

Таблица 10-2

Свойства примесей в кремнии

Примесь	Тип: донор (Д), акцептор (А)	Энергия ионизации*, эВ	Примесь	Тип: донор (Д), акцептор (А)	Энергия ионизации*, эВ
Al	А	0,057	In	А	0,16
As	Д	0,049	Li	Д	0,033
Au	А ₁	0,35	O	Д ₁	0,03
	А ₂	0,67		Д ₂	0,06
B	А	0,046	P	Д	0,044
Bi	Д	0,069	S	Д	0,18
Cu	А ₁	0,24		Д ₂	0,37
	А ₂	0,72	Sb	Д	0,039
Fe	А ₁	0,4	Te	А	0,26
	А ₂	0,66	Zn	А ₁	0,31
Ga	А	0,065		А ₂	0,66

* Для доноров энергия ионизации отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.

Таблица 10-3

Свойства примесей в германии

Примесь	Тип: донор (Д), акцептор (А)	Энергия ионизации*, эВ	Примесь	Тип: донор (Д), акцептор (А)	Энергия ионизации*, эВ
Al	А	0,0102	Li	Д	0,093
Ag	А	0,13; 0,5; 0,7	Mn	Д	0,16; 0,42
As	Д	0,0127	Ni	Д	0,22; 0,49
Au	А	0,16; 0,59; 0,75	O	Д	0,01
B	А	0,0104	P	Д	0,012
Be	А	0,07	Pt	Д	0,04; 0,20; 0,67
Bi	Д	0,012	S	Д	0,18
Cd	А	0,05; 0,15	Sb	Д	0,0096
Co	А	0,09; 0,25; 0,48	Se	Д	0,014; 0,28
Cu	А	0,4; 0,33; 0,53	Te	Д	0,11; 0,30
Fe	А	0,35; 0,52	Tl	А	0,01
Ga	А	0,0108	Zn	А	0,03; 0,09
In	А	0,0112			

* Для доноров энергия ионизации отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.

ме координат выражение $W_{1,2}(k)$ можно представить в виде

$$W_{1,2}(k) = W_{(0)} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} \left[A \pm \sqrt{B^2 + C^2 \sin^2 \theta (\sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \sin^2 \theta + \cos^2 \theta)} \right].$$

Отсюда следует, что изоэнергетические поверхности представляют собой деформированные сферы. Если это выражение усреднить по углам, то можно записать

$$W_{1,2}(k) = W_{(0)} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} \left[A \pm \sqrt{B^2 + \frac{C^2}{5}} \right],$$

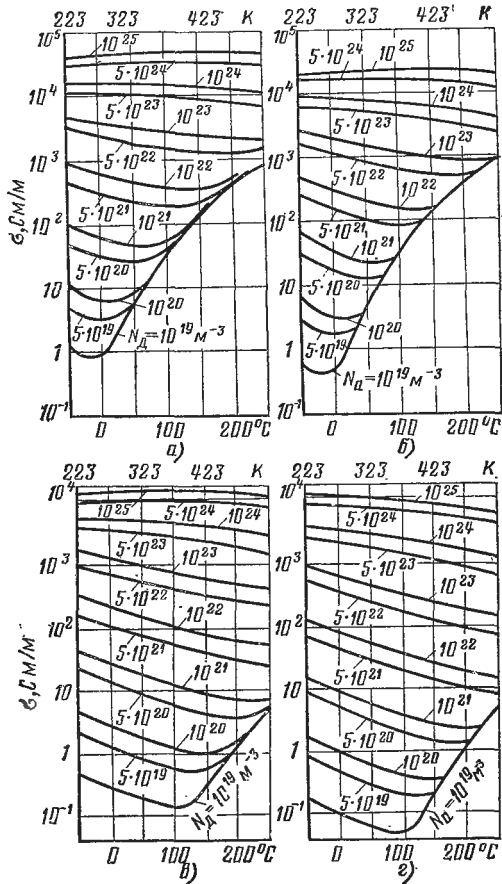


Рис. 10-9. Зависимость удельной электрической проводимости германия и кремния.

а — германий n -типа; б — германий p -типа; в — кремний n -типа; г — кремний p -типа.

т. е. деформированные поверхности равной энергии заменяются некоторой «средней» сферической поверхностью. В этом случае эффективную массу можно считать скалярной величиной:

$$m_{p1,2}^* = \frac{m_0}{A \pm \sqrt{B^2 + \frac{C^2}{5}}}.$$

Следовательно, существуют два вида дырок: $m_{p1}^* > m_{p2}^*$ — тяжелые и легкие дырки соответственно.

Для третьей подзоны $W(k)$ имеет вид:

$$W_3(k) = W_{(0)} - \Delta_{s0} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} A,$$

т. е. эффективная масса в третьей подзоне является скалярной величиной, равной

$$m_{p3}^* = m_0/A.$$

Электрические свойства простых полупроводников

Элемент	Кристаллическая структура		ρ , кг/м ³	$T_{пл}$, К	T_D , К	λ , Вт/(м·°С)	ϵ_r	ΔW_0 , эВ	$\frac{d\Delta W}{dT}$, 10 ⁻⁴ эВ/°С	$\frac{d\Delta W}{dp}$, 10 ⁻⁶ эВ/Па	m_n^*/m_0	m_p^*/m_0	μ_n , 10 ⁻⁴ м ² /(В·с)	μ_p , 10 ⁻⁴ м ² /(В·с)
	Тип	a, b, c , нм												
В	Тетрагональная	$a=0,873$, $c=0,503$	2330	2300	—	—	12	1,16	-8,5	—	—	0,7	1	50
С (алмаз)	Кубическая	$a=0,8566$	3510	4300	2240	550	—	5,4	-1,2	$<10^{-8}$	—	2,35 2,1	1800 ($\sim T^{-3/2}$)	1400 ($\sim T^{-3/2}$)
Р (черный)	Орторомбическая	$a=0,331$ $b=0,438$, $c=1,05$	2690	317	—	—	—	0,33	2,3	—	—	—	220 ($\sim T^{-3/2}$)	350 ($\sim T^{-3/2}$)
As (серый)	Тригональная	$a=0,375$, $c=1,052$	5730	1090	224	—	—	1,2	-5	—	$m_n=0,121$ $m_2=0,138$ $m_3=1,18$	$m_1=0,122$ $m_2=0,0805$ $m_3=1,04$	65	65
Se	Тригональная	$a=0,436$, $c=0,496$	4800	490	1200	—	—	2,85 2,0	-9 -23,8	-13	—	0,96	—	20 40—240
α -Sn	Кубическая	$a=0,646$	5770	505	230	67	—	0 (см. рис. 10-7)	-35 0	0	0,024 (в минимуме $<111>$)	$m_d=0,26$	2500 10 ⁵ (78 К) 10 ⁵ (4,2 К)	2400
Sb	Тригональная	$a=0,449$ $b=1,125$	6700	903,5	204	40 (100 К)	—	0,13	—	—	—	—	—	—
Te	Тригональная	$a=0,446$ $c=0,593$	6230	723	140	—	—	0,32	-1,9 —	-13 -16 -20	$m_{\perp}=0,037$ $m_{\parallel}=0,059$	$m_{\perp}=1,11$ $m_{\parallel}=0,264$ $m_d=0,4$	1700	1200
I	Орторомбическая	$a=0,477$, $b=0,725$, $c=0,977$	4940	387	—	—	10,3	1,3	—	—	—	—	25	—

Таблица 10-5

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений A III B V с кубической структурой

Соединение	Постоянная решетки a , нм	ρ , кг/м ³	$T_{пл}$, К	T_D , К	λ , 10 ³ Вт/(м·°C)	ϵ_r
AlP	0,542	2850	1770	588	0,92	9,83
AlAs	0,562	3600	1870	417	0,84	11
AlSb	0,610	4150	1327	292	0,59	11,5
GaP	0,544	4400	1623	446	0,75	10,12
GaAs	0,569	5400	1510	344	0,46	12,53 12,9
GaSb	0,609	5650	985	265	0,34	15 16,1
InP	0,586	4790	1327	321	0,67	14 12,4
InAs	0,606	5680	1216	249	0,27	14,5 14,9
InSb	0,648	5780	798	262	0,17	17 17,7

Продолжение табл. 10-5

Соединение	ΔW , эВ	$\frac{d\Delta W}{dT}$, 10 ⁻³ эВ/°C	$\frac{d\Delta W}{dp}$, 10 ⁻⁶ эВ/Па	$W_{г\Delta}$, эВ	$W_{г\pi}$, эВ	Δ_{sp} , эВ	$\frac{m_n^{(000)}}{m_0}$
AlP	3,0	—	—	—	—	0,05	—
AlAs	2,2	—	—	1,3	—	0,29	—
AlSb	1,9 1,6	$\begin{matrix} -3,5 (0\text{ K}) \\ -4,5 (78 \\ -300\text{ K}) \end{matrix}$	—1,6 [100]	0,7 0,29	—	0,75	0,09
GaP	2,34 2,3	—5,5	—1,7 [100]	0,35	0,25	0,1	0,12
GaAs	1,52	—5	$\begin{matrix} -12,5 [000] \\ -8,7 [100] \end{matrix}$	0,36	0,5	0,33	0,067
GaSb	0,813	$\begin{matrix} -3,5 \\ -4,1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 12 [000] \\ -10 [100] \\ 7,3 [111] \end{matrix}$	0,4	0,07	0,8	0,047
InP	1,416 1,4	$\begin{matrix} -4,6 \\ -2,9 \end{matrix}$	4,6	0,7	0,4	0,1	0,082
InAs	0,425	$\begin{matrix} -2,2 \\ -3,7 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 4,8 [000] \\ 8,5 [000] \\ 3,2 [111] \end{matrix}$			$\begin{matrix} 0,43 \\ 0,38 \end{matrix}$	0,023
InSb	—2,8	$\begin{matrix} -2,8 \\ -2,9 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 15,5 [000] \\ 14,2 [000] \end{matrix}$	—	$\begin{matrix} 0,45 \\ 0,5 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0,98 \\ 0,803 \end{matrix}$	0,014

Продолжение табл. 10-5

Соединение	$\frac{m_n^{(000)}}{m_0}$	$\frac{m_{p1}}{m_0}$	$\frac{m_{p2}}{m_0}$	$\frac{m_{dp}}{m_0}$	$\mu_n \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\mu_p \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
AlP	—	—	0,39	—	50	150
AlAs	—	—	0,22	—	1200	—
AlSb	0,39 0,25	0,4	0,12 0,137	0,9	200	420 (300 К) 3700 (77 К)
GaP	0,14 0,35 0,22 1,15	0,5 0,56	0,13 0,18	—	300 (300 К) 500 (77 К)	75 (300 К) 420 (77 К)
GaAs	1,2	0,5 0,475	0,89 0,089 0,091	0,5	8,5·10 ⁸ (300 К) 2,1·10 ⁴ (77 К)	420 (300 К) 4200 (77 К)
GaSb	—	0,23 0,36 0,26	0,05 0,052	0,39	4000 (300 К) 6000 (77 К)	1400 (300 К) 3600 (77 К)
InP	—	0,2 0,60	0,086 0,12	—	4,6·10 ⁸ (300 К) 2,4·10 ⁴ (77 К)	150 (300 К) 1200 (77 К)
InAs	—	0,4	0,025	0,38	3,3·10 ⁴ (300 К) 8,2·10 ⁴ (77 К)	460 (300 К) 690 (77 К)
InSb	—	0,04	0,015 0,0202	0,2	7,8·10 ⁴ (300 К) 1,2·10 ⁶ (77 К)	750 (300 К) 10 ⁴ (77 К)

Для анализа различных экспериментальных данных часто пользуются скалярной величиной эффективной массы плотности состояний (m_{dp}^* и m_{dn}^* для дырок и электронов соответственно), которая в случае эллипсоидальных поверхностей равной энергии находится из соотношения

$$m_{dn}^* = N^{2/3} [m_{\parallel}^* (m_{\perp}^*)^2]^{1/3},$$

где N — число эквивалентных минимумов (шесть минимумов для кремния и четыре для германия).

Для дырок в валентной зоне m_{dp}^* будет определяться из соотношения

$$m_{dp}^* = [(m_{p1}^*)^{3/2} + (m_{p2}^*)^{3/2} + (m_{p3}^*)^{3/2}]^{2/3}.$$

При расчетах вводятся, кроме того, понятия омической эффективной массы m_G^* и циклотронной эффективной массы m_c^* . Об-

щие выражения для них приведены в [10-2].

Концентрация свободных носителей и их подвижность определяются по эффекту Холла и удельной проводимости.

На рис. 10-9 приведены зависимости удельной электрической проводимости германия и кремния от концентрации примесей и температуры.

Для практических расчетов можно использовать следующие выражения дрейфовых подвижностей электронов и дырок:

для германия:

$$\mu_n = 4,90 \cdot 10^3 T^{-1,66} \text{ при } 100 \text{ К} < T < 280 \text{ К};$$

$$\mu_p = 1,05 \cdot 10^5 T^{-2,33} \text{ при } 100 \text{ К} < T < 290 \text{ К};$$

для кремния

$$\mu_n = 4,0 \cdot 10^5 T^{-2,6} \text{ при } 300 \text{ К} < T < 400 \text{ К};$$

$$\mu_p = 2,5 \cdot 10^4 T^{-2,3} \text{ при } 150 \text{ К} < T < 400 \text{ К}.$$

Параметры некоторых простых и двойных соединений приведены в табл. 10-3—10-5. Параметры многих двойных и тройных соединений, обладающих полупроводниковыми свойствами, приведены в [10-4—10-8].

Список литературы

- 10-1. Батавин В. В. Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев. — М.: Советское радио, 1976. — 104 с.
 10-2. Цидильковский И. М. Электроны и дырки в полупроводниках. — М.: Наука, 1972. — 640 с.
 10-3. Киреев П. С. Физика полупроводников. — М.: Высшая школа, 1977. — 590 с.
 10-4. Таблицы физических величин. Справоч-

ник под ред. И. К. Киконина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1006 с.

10-5. Полупроводники $A^2B^4C_2^5$ /Под ред.

Н. А. Горюновой, Ю. А. Валова — М.: Советское радио, 1974. — 374 с.

10-6. Полупроводники с узкой запрещенной зоной и их применение. Сб. — М.: Мир, 1969. — 255 с.

10-7. Бергер Л. И., Прочухан В. Д. Тройные алмазоподобные полупроводники — М.: Металлургия, 1968. — 152 с.

10-8. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп /Пер. с англ. под ред. Б. И. Болтакса. — М.: Мир, 1967. — 478 с.

10-9. Полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$ /Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1967. — 728 с.

Раздел 11

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

11-1. Назначение магнитных материалов. Общие сведения о параметрах и характеристиках	325
11-2. Классификация магнитных материалов	328
11-3. Магнитные материалы для работы в широком диапазоне изменения магнитных индукций на низких и повышенных частотах	333

11-4. Магнитные материалы для работы в слабых магнитных полях	337
11-5. Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса	341
11-6. Магнитно-мягкие материалы специального назначения	344
11-7. Магнитные материалы для постоянных магнитов	346
11-8. Цены	350
Список литературы	350

11-1. НАЗНАЧЕНИЕ

МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПАРАМЕТРАХ И ХАРАКТЕРИСТИКАХ

Магнитные материалы получают в технике все более широкое применение. В основном они играют роль концентраторов, проводников и источников магнитного потока. Магнитные материалы являются основой современных генераторов и двигателей, трансформаторов, различных типов аппаратов и приборов автоматики, вычислительной и измерительной техники, электромагнитов и дросселей, постоянных магнитов и т. д.

В общем случае все магнитные материалы принято делить на две большие группы: магнитно-мягкие, используемые в основном как проводники магнитного потока; магнитно-твердые, используемые как источники магнитного поля.

Необходимые характеристики магнитных материалов определяются в процессе перемагничивания, описываемого при цик-

лическом изменении магнитного поля в координатах магнитной индукции B (намагниченности M) и напряженности поля H петли гистерезиса (рис. 11-1). При этом связь магнитной индукции, намагниченности и напряженности поля выражается соотношением

$$B = \mu_0 (H + M),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

По петле магнитного гистерезиса определяются основные параметры магнитных материалов: индукция насыщения B_m , максимальная напряженность поля H_m , остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c . Площадь, заключенная внутри петли магнитного гистерезиса, является мерой энергии, преобразованной в тепло при перемагничивании. Энергия, затраченная на перемагничивание 1 м³ объема магнитного материала, определяется по формуле

$$P_r = \mu_0 \oint H dM = \oint H dB.$$

Кривая $B(H)$ может быть преобразована в кривую $M(H)$. Поэтому, как видно из

рис. 11-1, следует различать понятия коэрцитивной силы по индукции $H_{св}$ и коэрцитивной силы по намагниченности $H_{см}$. Зависимость $B(H)$ при монотонном изменении напряженности поля от нуля до максимального значения называется первоначальной кривой намагничивания. Для расчетов используются основной кривой намагничивания,

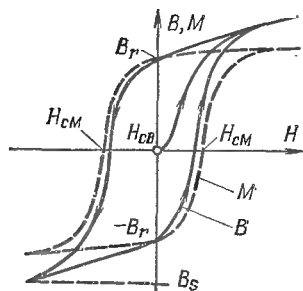


Рис. 11-1. Зависимость магнитной индукции и намагниченности ферромагнитного материала от напряженности поля.

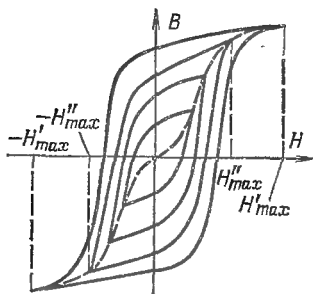


Рис. 11-2. Симметричные петли гистерезиса магнитного материала.

получаемой соединением вершин симметричных петель гистерезиса, получаемых при различных максимальных значениях напряженности поля (рис. 11-2).

Связь напряженности магнитного поля H и намагниченности магнитного материала M выражается через коэффициент пропорциональности, называемый магнитной восприимчивостью χ :

$$\chi = M/H.$$

Отношение магнитной индукции B к напряженности поля H в материале определяется абсолютной магнитной проницаемостью μ_a :

$$\mu_a = B/H.$$

В общем случае, если магнитная индукция и напряженность поля являются векторами, то проницаемость — тензор. Численно проницаемость характеризуется относительной проницаемостью

$$\mu_r = \mu_a/\mu_0.$$

Отношение изменения ΔB к соответствующему изменению ΔH на кривой намагничивания дает относительную дифференциальную магнитную проницаемость (рис. 11-3)

$$\mu_{rd} = \frac{dB}{\mu_0 dH}.$$

Полученная таким образом величина в полях, близких к нулю, носит название относительной начальной проницаемости, а

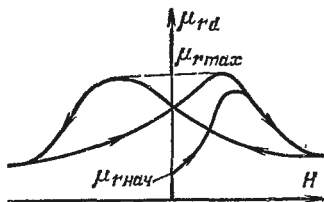


Рис. 11-3. Зависимость дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности поля.

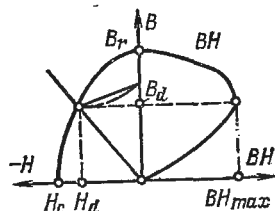


Рис. 11-4. Кривая размагничивания и зависимость энергии магнитного материала от напряженности поля.

максимальное ее значение на всей кривой намагничивания — относительной максимальной проницаемости.

Для характеристики магнитно-твердых материалов используют понятие размагничивающей части петли гистерезиса, находящейся во втором квадранте координатной плоскости $B(H)$. При наличии у постоянно магнита воздушного зазора остаточная индукция его B_a меньше остаточной индукции материала B_r , измеренной в замкнутой магнитной цепи. Поэтому качество постоянных магнитов характеризуется, как правило, максимальным значением произведения $(BH)_{max}$ (рис. 11-4). Наибольшая энергия, отдаваемая магнитом, получается тогда, когда для данной формы магнита подобран материал, имеющий максимальное значение произведения BH . В этом случае остаточная индукция магнита B_a в сильной степени зависит от формы размагничивающей части кривой $B(H)$ и размагничивающего фактора N , определяемого геометрическими соотношениями самого магнита и воздушного зазора. Истинное значение напряженности поля определяется соотношением

$$H_i = H_e - NM_s$$

где H_e — внешнее поле; H_i — поле внутри материала, а магнитной индукции соответственно

$$B = \mu_0 (H_e + M - NM).$$

Для оценки стабильности постоянных магнитов пользуются понятием относительной проницаемости возврата ($\mu_{гвозв}$), которая является мерой чувствительности магнитно-твердого материала к воздействию внешних магнитных полей (рис. 11-4) и определяется как

$$\mu_{гвозв} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}.$$

Все перечисленные параметры могут быть определены из статической петли гистерезиса, полученной при относительно медленном изменении внешнего магнитного поля. Если же время установления напряженности поля соизмеримо со временем перемagnetизации материала, то магнитные параметры определяют динамическими характеристиками (петлями гистерезиса), на характер которых влияют такие факторы, как вихревые токи, магнитная вязкость. Основными характеристиками являются: динамическая кривая намагничения — зависимость максимального значения индукции от максимального значения напряженности поля для семейства симметричных динамических петель гистерезиса; динамическая магнитная проницаемость $\mu_{га}$ (часто называемая амплитудной) — отношение индукции к напряженности поля на динамической кривой намагничения. Чаще всего амплитудная проницаемость $\mu_{га}$ определяется через соотношение

$$\mu_{га} = B_{max} / \mu_0 H_{max},$$

где B_{max} , H_{max} — соответственно максимальные значения магнитной индукции и напряженности поля.

Для многих материалов в качестве справочной характеристики приводят удельные потери на частотах 50, 400 Гц при различных значениях индукции (например, $P_{1,0/50}$ — потери на частоте 50 Гц при индукции, равной 1 Тл); значение тангенса угла потерь. При этом обязательным является указание толщины ленты или пластины из данного магнитного материала.

Особого внимания заслуживает чувствительность магнитных материалов к изменению температуры. Здесь следует различать обратимые изменения свойств материалов в диапазоне незначительных изменений температур и необратимые изменения в широком диапазоне температур, называемые старением. Для учета стабильности в первом случае пользуются значениями температурных коэффициентов, приводимых в справочных данных на материал. Необратимые процессы характеризуются температурой Кюри и заключаются в исчезновении самопроизвольной намагнитченности, уменьшении относительной магнитной проницаемости и в конечном счете в переходе от ферромагнит-

ного состояния к парамагнитному. Поэтому если необходимо знать предельные температуры работы магнитного материала, точка Кюри должна быть известна.

Существенное влияние на процесс намагничения тела оказывают коэффициенты магнитострикции и анизотропии. Эти параметры, не являясь справочными данными на магнитные материалы, в сильной

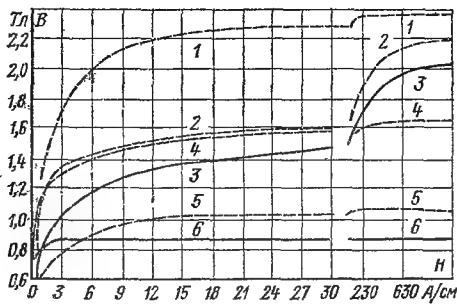


Рис. 11-5. Кривые намагничения магнитно-мягких материалов.

1 — пермаллюр; 2 — низкоуглеродистая сталь; 3 — электротехническая сталь; 4 — пермаллой марки 46Н; 5 — пермаллой марки 79НМ; 6 — пермаллой марки 80НХС.

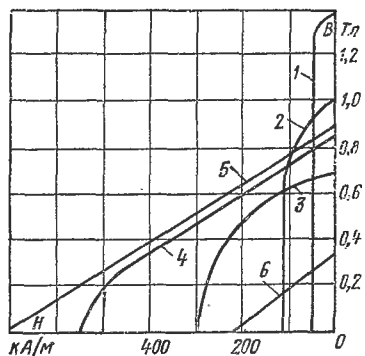


Рис. 11-6. Кривые размагничивания магнитно-твердых материалов.

1 — ЮНДК25БА; 2 — ЮНДК35Т5БА; 3 — ПЛК78; 4 — PrCo_5 ; 5 — SmCo_5 ; 6 — 2БА.

мере влияют на основные нижеперечисленные магнитные характеристики. Так, для получения магнитно-мягких материалов необходимо, чтобы коэффициенты анизотропии и магнитострикции были минимальными. Это возможно лишь в отсутствие постоянных включений и внутренних механических напряжений, т. е. практически при чистом металле. Поэтому кривые намагничения различных магнитно-мягких материалов (рис. 11-5) существенно отличаются. Чистое железо имеет малую коэрцитивную силу и высокую относительную магнитную проницаемость.

Для получения магнитно-твердых материалов с большой коэрцитивной силой (рис. 11-6) обычно используют: многодоменные материалы, у которых затруднено перемещение границ переходного слоя из-за наличия внутренних напряжений или высокой магнитострикции, посторонних включений или большой энергии анизотропии; однодоменные материалы, у которых достаточно велика энергия анизотропии и анизотропия формы. Раньше изготавливали постоянные магниты из материалов, удовлетворяющих первому условию. В настоящее время существуют множество магнитно-твердых материалов, удовлетворяющих и второму условию.

11-2. КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Деление магнитных материалов на магнитно-мягкие (МММ) и магнитно-твердые (МТМ) не дает полного представления о магнитных свойствах, их чувствительности к различным воздействиям, возможности использования для конкретных целей. Обычно с понятием чувствительности свойств магнитных материалов к различного рода воздействиям связывают представления о факторах, которые оказывают отрицательное влияние. Наиболее существенным в этом плане является химический состав материала (процентное содержание легирующих компонентов или наличие примесей).

Известно, что у ферромагнитных материалов магнитный момент, а значит, и намагниченность насыщения M_s зависят от обменной энергии и кристаллографической структуры. Таким образом следует ожидать, что у сплавов ферромагнитных материалов друг с другом или с неферромагнитными материалами намагниченность насыщения может изменяться в широких пределах. Например, сплав железа с кобальтом (30—50%) приводит к повышению M_s приблизительно на 10% по сравнению с чистым железом. Этот сплав характеризуется наибольшим значением намагниченности насыщения. В железоникелевых сплавах присадка никеля до 10% не вызывает изменения M_s (рис. 11-7). Увеличение процентного содержания его до 30% ведет к уменьшению M_s вплоть до нуля. Содержание никеля свыше 30% ведет к увеличению намагниченности. В сплаве с 50%-ным содержанием никеля M_s достигает 75% насыщения чистого железа, а затем монотонно уменьшается до M_s чистого никеля. Здесь следует подчеркнуть, что при незначительных изменениях состава сплавов магнитных материалов намагниченность насыщения, температура Кюри Θ , а также коэффициенты магнитострикции и анизотропии слабо изменяются и практически являются нечувствительными к изменению содержания легирующих элементов. Что касается таких характеристик как относительная магнитная проницаемость, остаточная индукция,

коэрцитивная сила, потери на гистерезис, то они чувствительны к воздействию различных факторов. Это открывает большие возможности для получения материалов с требуемыми свойствами. Технологический процесс изготовления их должен быть строго регламентирован, начиная с подбора шихтовых материалов и кончая термической об-

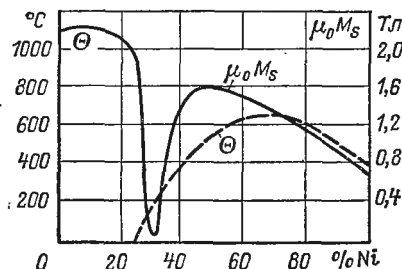


Рис. 11-7. Зависимость намагниченности насыщения и точки Кюри от процентного содержания присадок никеля.

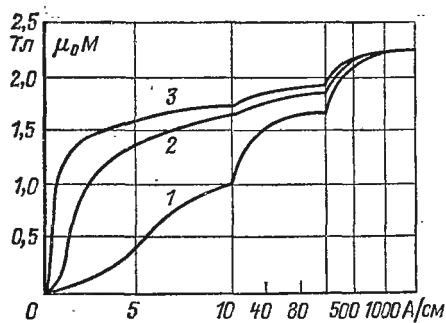


Рис. 11-8. Зависимость кривых намагничивания железа от напряженности поля при различных режимах термообработки.

1 — холодная обработка; 2 — нормальный отжиг; 3 — длительный отжиг.

работкой (рис. 11-8). Предпосылкой улучшения и получения необходимых свойств МММ и МТМ является повышение чистоты исходных компонентов различных сплавов. Так, у чистого железа намагничивание происходит легко, коэрцитивная сила мала. Однако получить свободное от примесей железо практически невозможно. Наиболее часто встречающиеся примеси (углерод, кислород, сера, фосфор и др.) находятся в железе в растворенном состоянии и в виде соединений с ним. Это уменьшает намагниченность, увеличивает коэрцитивную силу, приводит к уменьшению μ_{max} .

Для получения магнитных материалов с большим удельным сопротивлением и большой проницаемостью при индукции 1,2—1,7 Тл используют добавку кремния от 0,5 до 4%, обезуглероживающего примеси железа. При этом кремний способствует росту крупных зерен, улучшающих магнит-

ные свойства, увеличивает электрическое сопротивление, что приводит к снижению потерь на вихревые токи при работе материала в переменных полях (рис. 11-9).

Наивыгоднейшим сплавом для обеспечения высокого значения магнитной прони-

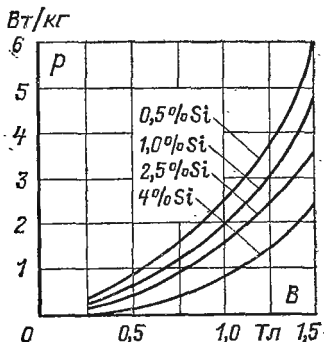


Рис. 11-9. Зависимость удельных потерь от индукции при различном процентном содержании кремния.

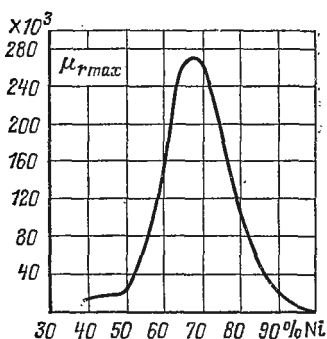


Рис. 11-10. Зависимость максимальной магнитной проницаемости пермаллоя от процентного содержания никеля при термической обработке в магнитном поле.

цаемости является сплав железа с никелем (пермаллой). Высокие магнитные свойства пермаллоев объясняются малыми коэффициентами анизотропии и магнитострикции. При этом коэффициент анизотропии меняет знак, проходя через нуль при 70%-ном содержании никеля, а при 82%-ном содержании приближается к нулю коэффициент магнитострикции. Именно поэтому пермаллой с 78%-ным содержанием никеля обладает очень большой μ_{rmax} и малой H_c . Дальнейшее улучшение свойств этих сплавов достигается специальными видами термической обработки (рис. 11-10) [11-2].

Для получения материалов с большой начальной и максимальной относительной проницаемостью, высокой индукцией насыщения и малой коэрцитивной силой используют сплавы с 45 и 50%-ным содержанием никеля (45Н и 50Н). Большая прямоугольность гистерезисного цикла достигается ис-

пользованием сплавов с кристаллографической и магнитной текстурой. Повышение чувствительности к слабым магнитным полям обеспечивают легированием пермаллоевых сплавов молибденом, хромом и кремнием, хромом и медью.

Часто требуются материалы с постоянной μ_r в малых полях. Такие материалы получаются путем сплава железо-никель-кобальт (30% Fe, 25% Co, 45% Ni) и называются перминварами. Они обладают практически безгистерезисной кривой перемагничивания в малых полях. Постоянной μ_r обладают также сплавы никель — железо — медь (45% Ni, 45% Fe, 10% Cu), называемые изопермами.

Для получения больших значений индукции при сравнительно небольших полях, необходимых для построения магнитных систем измерительных приборов, используются материалы на основе сплавов железо — кобальт (50% Co, 1,7% V, остальное железо), называемых пермендюрором.

В некоторых областях техники требуются термозависимые и магнитострикционные магнитные материалы. Для получения первых используют сплавы на основе никеля с медью (30—40% Cu, остальное никель) — калмаллои. Для получения магнитострикционных материалов исходными компонентами являются сплав железа с 14% алюминия, никель и кобальтовый феррит $CoO \cdot Fe_2O_3$.

Материалы, работающие в динамическом режиме, должны обладать большим электрическим сопротивлением для получения минимальных потерь на вихревые токи в широком частотном диапазоне работы. Большое распространение здесь получили неметаллические магнитные материалы — ферримангнетики, к которым относятся ферриты. Электрические и магнитные свойства их в сильной степени зависят от состава и структуры. Для увеличения, например, значений начальной относительной магнитной проницаемости широко используются никель-цинковые и марганец-цинковые сплавы. Улучшения температурной стабильности добиваются добавлением небольшого количества крупнозернистого феррита с несколько меньшей точкой Кюри. Увеличение относительной проницаемости обеспечивают путем подбора компонент материала. Например, добавка 0,5% Fe к никель-цинковому ферриту приводит к увеличению μ_r в 5 раз.

Намного раньше ферритов промышленное внедрение получили магнитодиэлектрики. Исходным материалом для них служило карбонильное железо-порошок. Снижение потерь на гистерезис можно добиться, обрабатывая порошок в среде азота, но при этом уменьшается магнитная проницаемость. Наоборот, для увеличения μ_r порошок отжигают в водородной печи для удаления углерода. Наряду с карбонильным железом после открытия пермаллоев ведутся работы по изготовлению порошков из сплавов с высокой магнитной проницаемо-

стью (молибденовый пермаллой). Большое распространение получили магнитодизлектрики на основе порошка из сплава альсифер (85% Fe; 9,5% Si; 5,5% Al). Сам сплав имеет высокую магнитную проницаемость, но достаточно хрупкий.

Для получения постоянных магнитных полей большой напряженности используются постоянные магниты, выполненные из магнитно-твердых материалов. Первые для изготовления МТМ использовались углеродистые стали с содержанием углерода до 1%. Улучшение свойств МТМ достигалось добавлением легирующих элементов (вольфрам, хром, молибден, кобальт). Стремление к удешевлению МТМ привело к созданию сплавов на основе железа, никеля и алюминия (12% Al, 25% Ni). Добавление к этим сплавам кобальта еще больше увеличивает H_c , но одновременно уменьшает B_r . Охлаждение сплавов от точки Кюри в магнитном поле делает материал анизотропным (текстурованным). При этом увеличивается B_r , петля гистерезиса становится прямоугольной, увеличивается магнитная энергия.

Широкое распространение имеют дисперсионно-твердые сплавы типа викаллой (железо—никель—медь, железо—кобальт—ванадий), хорошо поддающиеся механической обработке, но уступающие по магнитным свойствам материалам типа ЮНДК.

Гораздо большей коэрцитивной силой обладают сплавы, в которых имеются компоненты из драгоценных металлов, например платина. Эти сплавы (содержание Pt до 78%) имеют большую коэрцитивную силу, магнитную энергию и используются для миниатюрных магнитов.

В последние годы получены магнитные материалы с очень большими (пока рекордными) значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии, выполненные на основе сплава редкоземельных материалов с кобальтом. Они открывают широкие возможности для проектирования микромагнитных систем в радиотехнике, авиационной и ракетной технике.

Большие значения констант анизотропии и размеров однодоменных частиц бариевых ферритов привело к очень широкому использованию их для изготовления постоянных магнитов со значительной магнитной энергией. Улучшенные характеристики наблюдаются у магнитотекстурованных образцов (прессование в магнитном поле). Нетекстурованные магниты из бариевых ферритов обозначаются БИ, а текстурованные — БА.

Таким образом, становится очевидной связь магнитных свойств с химическим составом конечного продукта, показывающая на большие возможности получения магнитных материалов с заданными необходимыми параметрами и использования их в конкретных целях.

Одним из классифицирующих критериев применимости материала для тех или

иных целей является рабочий участок кривой перемагничивания на петле магнитного гистерезиса. На рис. 11-11 представлены области работы основных групп магнитных материалов в зависимости от условий их использования.

От материалов, область работы которых характеризуется рис. 11-11, а, требуется, как правило, высокое значение индукции насыщения, малые потери на перемагничива-

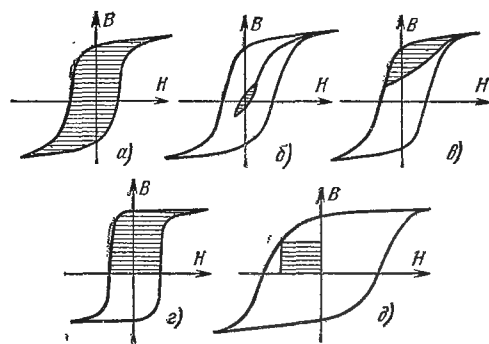


Рис. 11-11. Области работы основных групп магнитных материалов.

а — материалы для работы в широком диапазоне изменения индукций; б — материалы для работы в слабых полях; в — материалы для магнитопроводов реле и импульсных устройств; г — материалы для запоминающих устройств и магнитных усилителей; д — материалы для постоянных магнитов.

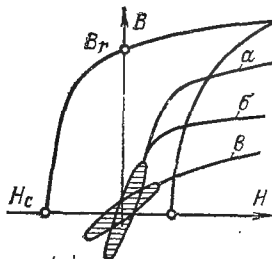
ние в области низких частот. Используют такие материалы большая область электротехники, включающая машины постоянного и переменного тока, силовые трансформаторы, силовую коммутационную аппаратуру. Основными требованиями здесь являются обеспечение хорошей магнитной связи между элементами устройств, обеспечение значительного магнитного потока при минимальном расходе магнитного материала, обеспечение возможно меньших потерь на перемагничивание. Первое требование, как правило, выполняется выбором рабочей точки на кривой намагничивания, соответствующей максимальной относительной магнитной проницаемости; второе удовлетворяется использованием материалов с большой индукцией насыщения, основным компонентом которых является железо. Обеспечение возможно меньших потерь на гистерезис и вихревые токи связано как с магнитными свойствами, зависящими от H_c , так и с электрическими и конструктивными свойствами, зависящими от содержания различных присадок и толщины листов магнитопроводов. Следует отметить, что увеличение удельного сопротивления в применяемых сплавах ограничено, так как проводимость является характерным свойством металла как основного компонента магнитного материала; уменьшение толщины листов магнитопроводов ограничивается экономическими соображениями. Поэтому группа мате-

риалов (в основном электротехнические стали), используемая в качестве рабочего участка всю петлю гистерезиса, применяется в устройствах, работающих на низких частотах.

При построении аппаратуры передачи и приема информации, малогабаритных трансформаторов питания, дросселей и т. д. требуются магнитные материалы, обладающие высокой проницаемостью на начальном

Рис. 11-12. Сравнительные характеристики для материалов, работающих в слабых полях.

α — пермаллой; β — феррит; γ — магнитодиэлектрик.



участке кривой $B(H)$, малыми потерями на гистерезис и вихревые токи (рис. 11-11, б). Здесь широкое применение находят металлические листовые, порошкообразные (магнитодиэлектрики) и оксидные (ферриты) материалы. Высокое значение $\mu_{нач}$ обеспечивается внутрискруктурными напряжениями, минимальными коэффициентами магнитострикции и анизотропии. На рис. 11-12 для сравнения показаны области работы используемых магнитных материалов типа пермаллоев, ферритов и магнитодиэлектриков. Как видно из рисунка, хотя $\mu_{нач}$ у магнитодиэлектриков значительно меньше, чем у металлических материалов, они являются так же как и ферриты, практически незаменимыми при работе в широком частотном диапазоне. Объясняется это теми обстоятельствами, которые характеризуют технологические свойства и стоимость материала. Большое значение имеет факт широкого внедрения ферритов, вытесняющих в последнее время магнитодиэлектрики. Что касается частотных свойств материалов, то их использование в зависимости от типа материала распространяется на области средних (пермаллой), высоких и сверхвысоких (ферриты, магнитодиэлектрики) частот.

В измерительных и регулировочных трансформаторах при широком изменении индукции (порядка 0,1—0,3 Тл) требуется постоянство коэффициента передачи, минимальное значение активных и реактивных потерь. Для выполнения этих требований магнитный материал должен иметь большую и мало изменяющуюся проницаемость в широком диапазоне изменения индукций. Оценочными показателями здесь являются максимальная эффективная относительная проницаемость и диапазон индукции, соответствующий уменьшению ее на определенную конкретную величину. Чем выше этот показатель, тем материал лучше. Удельные потери определяются удельным сопро-

тивлением материала и толщиной его. Большое распространение здесь получили текстурированные кремнистые стали с содержанием кремния до 6%, имеющие большое удельное сопротивление ρ . Широкий диапазон индукции с постоянной проницаемостью обеспечивается за счет высокой индукции насыщения. Возможно применение и железоникелевых сплавов (содержание никеля 50—75%) с малой толщиной листов материала, однако это связано с ограниченными экономическими характеристиками, приводящими к увеличению стоимости материала.

Особые требования предъявляются к материалам импульсных трансформаторов, работающих с унipoлярными импульсами. Важным здесь является большая относительная импульсная проницаемость, определяемая как

$$\mu_{pi} = \frac{B_{max} - B_r}{\mu_0 H_{max}}$$

Обеспечивается это высокой индукцией насыщения, малым значением остаточной индукции используемого материала (область работы определяется рис. 11-11, в). Для выполнения указанных требований часто используют специальные железоникелевые

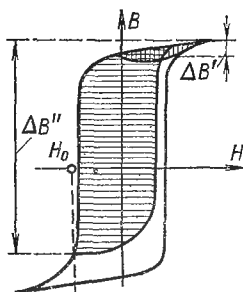


Рис. 11-13. Кривые импульсного намагничивания материалов без подмагничивания и с подмагничиванием постоянным магнитным полем.

сплавы (содержание никеля 60—65%) с $B_r/B_{max}=0,2$, марганцево-цинковые ферриты, имеющие это отношение на уровне 0,2—0,3 и начальную относительную проницаемость не менее 5000, но отличающиеся дешевизной получения. При использовании материалов с прямоугольной петлей гистерезиса большой эффект дает подмагничивание полем противоположной полярности (рис. 11-13). Так, подмагничивание отрицательным полем H_0 приводит к изменению индукции $\Delta B''$, при воздействии унipoлярного импульса на много превосходящему изменению $\Delta B'$ в отсутствие подмагничивающего поля. Иногда для получения требуемого значения μ_{pi} вводят в устройство воздушный зазор, приводящий к уменьшению эффективного значения остаточной индукции при сохранении на прежнем уровне B_{max} .

Требования к магнитным материалам реле я различной коммутационной аппаратуры (рабочий участок представлен рис. 11-11, в) определяются надежностью срабатывания, отскакивания и быстротой действия. Для обеспечения надежности срабатывания ма-

териалы должны иметь высокое значение намагниченности при малых полях. Надежность отпускания определяется H_c материала. Быстродействие зависит от удельного электрического сопротивления материала. Поэтому при проектировании, например, контакторов, в которых силы магнитного поля преодолевают большие противодействующие усилия, на первый план выдвигается критерий надежности срабатывания и

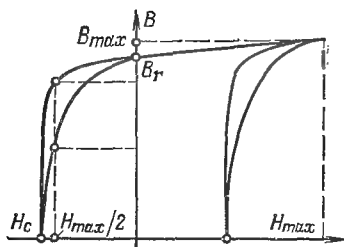


Рис. 11-14. Петли гистерезиса с одинаковым коэффициентом прямоугольности и различным коэффициентом квадратности.

надежности отпускания. Постоянная времени здесь в основном определяется механическими параметрами. В этой группе реле используют обычно малоуглеродистую сталь или технически чистое железо. В чувствительных реле высокого быстродействия большого внимания заслуживают надежность отпускания и быстродействие. Надежность срабатывания обеспечивается легкостью якоря и незначительной упругостью контактных пружин. Здесь нашли применение железоникелевые сплавы (шихтованный магнитопровод) и магнитно-мягкие ферриты. В нормальных коммутационных реле переменного тока учитываются все требования — надежность срабатывания, надежность отпускания, быстродействие. С учетом стоимости и срока службы применяется в качестве магнитного материала низколегированная электротехническая сталь.

В последние годы все большее распространение приобретает магнитный способ запоминания информации. Большое применение запоминающие устройства (ЗУ) на магнитных элементах нашли в вычислительной технике. Для обеспечения надежности достоверной записи и воспроизведения информации требуются материалы с высокой намагниченностью. Это позволяет получить большую разность индукций между B_r при одном направлении поля и B_{max} при противоположном. Кривая перехода от $+B_r$ к $-B_{max}$ должна быть крутой для обеспечения значительной скорости изменения индукции dB/dt . С этой же целью проводимость материала по возможности должна быть низкой. Кроме коэффициента прямоугольности $\alpha_p = B_r/B_{max}$ качество магнитного материала (рис. 11-11, а) оценивается коэффициентом квадратности R_s (рис. 11-14)

$$R_s = \frac{B(\text{при } -0,5H_{max})}{B(\text{при } +H_{max})}.$$

Высококачественный материал должен иметь большой коэффициент R_s и узкую петлю гистерезиса. Кроме того, используемые в запоминающих устройствах материалы должны иметь минимальное время переключения t_s , с, определяемое как

$$t_s = 10 \frac{\pi B_{max} d^2}{\rho (H_{max} - H_c)},$$

где B_{max} , H_{max} — максимальные значения индукции и напряженности поля, Тл, А/м; H_c — коэрцитивная сила, А/м; d — толщина материала, м; ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

Широко используются для элементов ЗУ и магнитных усилителей пермаллой с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), имеющий кубическую текстуру, ферриты с ППГ, объем внедрения которых самый большой из-за дешевизны изготовления и минимального времени переключения. Эти преимущества ферритов компенсируют такие недостатки, как высокий температурный коэффициент и низкие значения индукции.

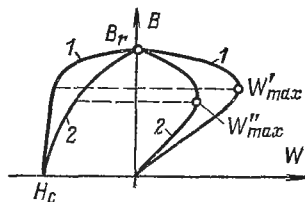


Рис. 11-15. К оценке влияния степени выпуклости размагничивающего участка MTM на магнитную энергию.

Большой объем производства магнитных материалов приходится на магнитотвердые материалы, служащие первичным сырьем для изготовления постоянных магнитов. Рабочий участок у них находится во втором квадранте петли магнитного гистерезиса (рис. 11-11, б). Поскольку основное целевое назначение постоянных магнитов заключается в создании постоянных магнитных полей, магнитно-твердые материалы характеризуются магнитной энергией, которую можно развить в заданной магнитной системе. Она определяется в зависимости от условий работы остаточной индукцией, коэрцитивной силой и степенью выпуклости кривой размагничивания (рис. 11-15). В настоящее время для изготовления постоянных магнитов большое распространение получили: мартенситные стали; дисперсионно-твердеющие сплавы; деформируемые сплавы; сплавы со сверхструктурой; порошковые магнитные материалы; материалы с обменной анизотропией.

11-3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАБОТЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ ИНДУКЦИЙ НА НИЗКИХ И ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТАХ

Самым распространенным ферромагнитным веществом является железо. Получить свободное от примесей железо практически невозможно. Наибольшее распространение получило технически чистое железо (низкоуглеродистая электротехническая сталь). Его как самостоятельный материал используют для изготовления сердечников электромагнитов постоянного тока, полюсных башмаков, реле и ряда других устройств, работающих в постоянных и низкочастотных магнитных полях практически на всех участках петли магнитного гистерезиса. Применение низкоуглеродистой стали для работы в переменных полях ограничено из-за низкого удельного сопротивления.

В СССР тонколистовая низкоуглеродистая сталь выпускается согласно ГОСТ 3836-73 [11-4] горячекатаной и холоднокатаной. Содержание углерода в них не превышает 0,04%, а других примесей 0,6% (табл. 11-1). ГОСТ 11036-75 [11-7] регламентирует магнитные свойства сортовой низкоуглеродистой стали с содержанием углерода до 0,035% и других примесей до 0,95% (табл. 11-2).

За рубежом из низкоуглеродистых сталей широко используется железо марок

Таблица 11-1

Сталь электротехническая нелегированная
тонколистовая и ленты, ГОСТ 3836-73*

Марка стали	H_c , А/м	$\mu_r \max \cdot 10^{-3}$	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м					
			B_{300}	B_{1000}	B_{2000}	B_{3000}	B_{4000}	B_{5000}
			Не менее					
10895	95,0	3,0	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
20895	95,0	3,0	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
10880	80,0	4,0	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
20880	80,0	4,0	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
10864	64,0	4,5	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
20864	64,0	4,5	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
10848	48,0	4,8	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
20848	48,0	4,8	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
20832	32,0	5,0	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05

* Марки нелегированных электротехнических сталей расфигуровывают следующим образом: первая цифра — класс по виду обработки (1 — горячекатаная, 2 — холоднокатаная, калиброванная); вторая цифра — тип по содержанию кремния (0 — сталь нелегированная, без нормирования коэффициента старения, 1 — сталь нелегированная с заданным коэффициентом старения); третья цифра — группа по нормируемой характеристике (8 — коэрцитивная сила); четвертая и пятая цифры — значение нормируемой характеристики (H_c) в целых единицах А/м.

Таблица 11-2

Сталь сортовая электротехническая
нелегированная, ГОСТ 11036-75

Марки стали		Коэрцитивная сила в разомкнутой цепи, А/м	Магнитная индукция в замкнутой цепи, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м		
Новое обозначение	Старое обозначение		B_{600}	B_{1000}	B_{2500}
10895	Э12	95,0	1,32	1,45	1,54
20895		95,0	1,32	1,45	1,54
11895		95,0	1,32	1,45	1,54
21895		95,0	1,32	1,45	1,54
10880	Э10	80,0	1,36	1,47	1,57
20880		80,0	1,36	1,47	1,57
11880		80,0	1,36	1,47	1,57
21880		80,0	1,36	1,47	1,57
10864	Э8	64,0	1,40	1,50	1,60
20864		64,0	1,40	1,50	1,60
11864		64,0	1,40	1,50	1,60
21864		64,0	1,40	1,50	1,60

«Гиперм 0», армко-железо, близкие по своим свойствам к отечественным, и железо марок R₃ и S₃, несколько превосходящее их по значениям $\mu_{\text{нач}}$, μ_{max} и имеющие меньшую H_c .

Для изготовления магнитопроводов асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт используют электротехнические стали с содержанием кремния до 0,4% марок 2011, 2012, 2013 с толщиной ленты 0,5 и 0,65 мм. Магнитная индукция при изменении напряженности поля от 2500 до 30 000 А/м изменяется в пределах 1,48—

Таблица 11-3

Свойства тонколистовой электротехнической
холоднокатаной анизотропной стали.
ГОСТ 21427-1-75

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м		
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	2500
3411 (Э310)	0,50	1,10	2,45	3,20	—	—	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	—	—	1,75
3412 (Э320)	0,50	0,95	2,10	2,80	—	—	1,85
	0,35	0,70	1,50	2,20	—	—	1,85
3413 (Э330)	0,50	0,80	1,75	2,50	—	—	1,85
	0,35	0,60	1,30	1,90	—	—	1,85
	0,30	—	1,19	1,75	—	—	1,85
3414 (Э330А)	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88
	0,30	—	1,03	1,50	1,60	1,70	1,88
	0,28	—	1,05	1,55	—	—	1,85
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	1,90
	0,30	—	0,97	1,40	1,61	1,71	1,90
	0,28	—	0,95	1,38	1,61	1,71	1,90
3416	0,28	—	0,89	1,30	1,61	1,70	1,90

2,05 Тл. Потери на частоте 50 Гц составляют для стали 2011—3,5 Вт/кг, для стали 2012—2,9 Вт/кг при магнитной индукции 1 Тл. С увеличением B они соответственно возрастают до 8,0 и 6,5 Вт/кг. Механические напряжения, возникающие в результате обработки этих материалов, в значительной степени ухудшают магнитные свойства.

Внутренние напряжения, возникающие после обработки, снимают отжигом при 830°C . При необходимости получения особо высоких магнитных свойств термообработку проводят в вакууме при высокой температуре.

Для получения материалов с большим удельным сопротивлением и большой относительной магнитной проницаемостью при индукции 1,2—1,7 Тл используют легирование железа кремнием от 0,4 до 5%. Железо-кремнистая сталь (электротехническая сталь) нашла применение при изготовлении магнитопроводов электрических машин, силовых трансформаторов и коммутирующей аппаратуры силовых электрических цепей*. При изготовлении магнитопроводов указанной аппаратуры необходимо учитывать анизотропию свойств некоторых материалов, обладающих кристаллографической и магнитной текстурой, приводящей к тому, что кривая намагничивания вдоль направления прокатки идет значительно круче, чем в направлении, перпендикулярном прокатке [11-5]. Основные свойства различных марок электротехнической стали, регламентируемые ГОСТ 21427.1-75—21427.3-75 [11-6], приведены в табл. 11-3—11-5.

Для изготовления магнитопроводов силовых трансформаторов применяют горячекатаные электротехнические стали 1511, 1512, 1513, 1514 и холоднокатаные текстурованные стали 3411, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416. Удельное сопротивление их составляет примерно $60 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. В настоящее время холоднокатаные стали вытесняют стали, изготовленные горячей прокаткой. Это происходит из-за более высоких магнитных свойств холоднокатаных сталей. Кроме того, более гладкая поверхность последних позволяет увеличить коэффициент заполнения объема до 98%, а изготовление ее в рулонах облегчает автоматизировать процессы резки, штамповки и измерения магнитных характеристик. Более высокая

Таблица 11-4

Свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной изотропной стали, ГОСТ 21427.2-75

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м					
		P ₁ , 0/50	P ₁ , 5/50	1000	2500	5000	10 000	130 000	
2011 (Э0100)	0,65	3,8	9,0	1,48	1,60	1,70	1,80	2,02	
	0,50	3,5	8,0	1,49	1,60	1,70	1,80	2,02	
2012 (Э0300)	0,65	3,6	8,0	1,50	1,62	1,72	1,82	2,02	
	0,50	2,9	6,5	1,50	1,62	1,72	1,82	2,02	
2013	0,65	3,1	7,0	1,53	1,64	1,74	1,85	2,05	
	0,50	2,5	5,6	1,54	1,65	1,75	1,85	2,05	
2111 (Э100)	0,65	4,3	10,0	1,45	1,58	1,66	1,75	2,00	
	0,50	3,5	8,0	1,46	1,58	1,67	1,78	2,00	
2112 (Э1000АА)	0,65	3,5	8,0	1,46	1,59	1,67	1,77	2,02	
	0,50	2,6	6,0	1,46	1,60	1,68	1,77	2,02	
2211 (Э1300)	0,65	3,0	7,0	1,40	1,56	1,65	1,73	1,96	
	0,50	2,6	5,8	1,40	1,56	1,65	1,76	2,00	
2212	0,65	2,6	6,3	1,42	1,58	1,67	1,77	2,00	
	0,50	2,2	5,0	1,42	1,60	1,68	1,77	2,00	
2311 (Э2200)	0,65	2,5	5,8	1,36	1,52	1,62	1,72	1,96	
	0,50	1,9	4,4	1,38	1,54	1,64	1,74	1,96	
2312	0,65	2,4	5,6	1,38	1,54	1,64	1,72	1,96	
	0,50	1,75	4,0	1,40	1,56	1,66	1,74	1,96	
2411 (Э3100)	0,50	1,6	3,6	1,37	1,49	1,60	1,73	1,96	
	0,35	1,3	3,0	1,37	1,50	1,60	1,70	1,95	
2412	0,50	1,30	3,1	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95	
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95	

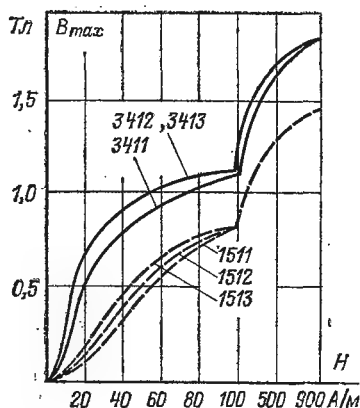


Рис. 11-16. Зависимость амплитуды индукции от действующего значения напряженности поля холоднокатаных и горячекатаных сталей.

* Марки электротехнических сталей расшифровываются следующим образом: первая цифра — вид прокатки, структурное состояние (1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная анизотропная); вторая цифра — содержание кремния (0 — до 0,4%, 1 — от 0,4 до 0,8%, 2 — от 0,8 до 1,8%, 3 — от 1,8 до 2,8%, 4 — от 2,8 до 3,6%, 5 — от 3,6 до 4,8%); третья цифра — группа по основной нормируемой характеристике (0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл на частоте 50 Гц, 1 — удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл на частоте 50 Гц, 2 — удельные потери при магнитной индукции 1 Тл на частоте 400 Гц, 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м; 7 — магнитная индукция при напряженности поля 10 А/м); четвертая цифра — порядковый номер типа стали.

стойность холоднокатаных сталей компенсируется значительным уменьшением потерь холостого хода, снижением общей массы готовых изделий из них. Следует заметить, что для электрических машин, турбо- и гидротрансформаторов большой мощности с массивными магнитопроводами основным магнитным материалом остаются,

однако, горячекатаные стали 1511—1514. Сравнительные характеристики (зависимость амплитуды индукции от

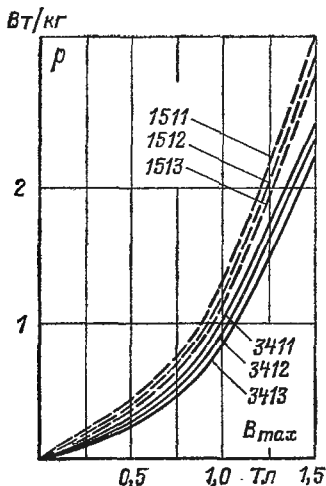


Рис. 11-17. Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции холоднокатаных и горячекатаных сталей.

Таблица 11-5

Свойства тонколистовой электротехнической горячекатаной изотропной стали, ГОСТ 21427.3-75

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м					
		P ₁ , 0,50	P ₁ , 5,50	1000	2500	5000	10 000	30 000	
1211 (Э11)	1,00	5,8	13,4	—	1,53	1,63	1,76	2,00	
	0,50	3,8	7,7	—	1,53	1,64	1,76	2,00	
	0,35	3,4	12,5	—	1,53	1,62	1,76	2,00	
1212 (Э12)	1,00	5,4	8,0	—	1,50	1,62	1,75	1,98	
	0,50	3,1	7,2	—	1,50	1,62	1,75	1,98	
	0,35	3,7	10,7	—	1,50	1,62	1,75	1,98	
1213 (Э13)	1,00	4,2	7,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98	
	0,50	2,8	6,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98	
	0,35	2,5	6,1	—	1,48	1,59	1,73	1,95	
1311 (Э21)	0,50	2,5	5,3	—	1,48	1,59	1,73	1,95	
	0,35	2,2	4,6	—	1,48	1,59	1,73	1,95	
	0,35	2,1	4,6	—	1,48	1,59	1,73	1,95	
1312 (Э22)	0,50	2,2	5,3	—	1,48	1,59	1,73	1,95	
	0,35	2,1	4,6	—	1,48	1,59	1,73	1,95	
	0,35	2,1	4,6	—	1,48	1,59	1,73	1,95	
1411 (Э31)	0,50	2,0	4,4	—	1,46	1,57	1,72	1,94	
	0,35	1,6	3,6	—	1,46	1,57	1,71	1,92	
	0,35	1,8	3,9	—	1,46	1,57	1,71	1,92	
1412 (Э32)	0,50	1,4	3,2	—	1,46	1,57	1,71	1,92	
	0,35	1,4	3,2	—	1,46	1,57	1,71	1,92	
	0,35	1,56	3,5	—	1,48	1,59	1,73	1,94	
1413 (Э33)	0,50	1,56	3,5	—	1,48	1,59	1,73	1,94	
	0,35	1,35	3,0	—	1,48	1,59	1,73	1,94	
	0,35	1,55	3,5	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90	
1511 (Э41)	0,50	1,55	3,5	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90	
	0,35	1,35	3,0	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90	
	0,35	1,40	3,1	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	
1512 (Э42)	0,50	1,40	3,1	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	
	0,35	1,20	2,8	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	
	0,35	1,25	2,9	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	
1513 (Э43)	0,50	1,25	2,9	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	
	0,35	1,05	2,5	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	
	0,35	1,15	2,7	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	
1514 (Э43А)	0,50	1,15	2,7	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	
	0,35	0,90	2,2	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	
	0,35	1,15	2,7	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	

действующего значения напряженности поля, зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции) описанных горячекатаных и холоднокатаных сталей приведены на рис. 11-16, 11-17. Для магнитопроводов синхронных и асинхронных машин и машин постоянного тока мощностью более 100 кВт применяют также горячекатаные стали 1311, 1411 и холоднокатаные

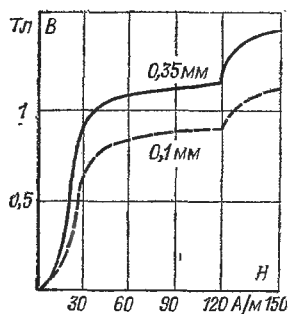


Рис. 11-18. Основные кривые намагничивания сплава марки 45Н.

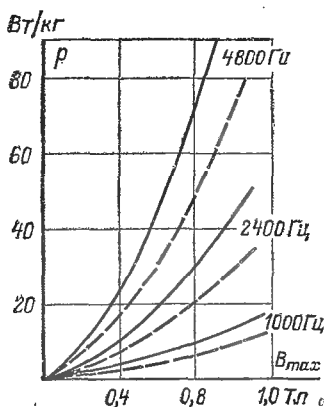


Рис. 11-19. Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции сплава марки 60Н для различных частот.

— толщина ленты 0,1 мм; — — — — — толщина ленты 0,05 мм.

стали 2411, 2412. Удельные сопротивления их составляют соответственно $40 \cdot 10^{-8}$ и $50 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

При изготовлении магнитных систем электрических машин мощностью до 100 кВт применяют слаболегированные горячекатаные стали 1211, 1212. Удельное сопротивление их ниже и находится в пределах 22×10^{-8} — $30 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Более высокой проницаемостью и более низкими потерями обладают холоднокатаные малотекстурованные стали 2211, 2212 по сравнению с горячекатаными той же степени легирования кремнием.

В силовых агрегатах, работающих на повышенных частотах (400 Гц и более),

Таблица 11-6

Магнитные свойства стали 1521, ГОСТ 21427.3-75

Марка стали	Толщина, мм	Магнитная индукция, Тл, при напряженности поля, А/м			Удельные потери, Вт/кг	
		500	1000	2500	$P_{0,75/400}$	$P_{1,0/400}$
1521	0,35	1,21	1,30	1,44	10,7	19
	0,22	1,20	1,29	1,42	8,0	14,0
	0,2	1,20	1,29	1,42	7,2	12,5
	0,1	1,19	1,28	1,40	6	10,5

Таблица 11-7

Магнитные свойства ленты холоднокатаной рулонной анизотропной стали, ГОСТ 21427.4-78

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг		Коэрцитивная сила, А/м, не более	Магнитная индукция, Тл, при напряженности поля, А/м					
		$P_{1,0/400}$	$P_{1,5/400}$		40	80	200	400	1000	2500
3421 (Э340)	0,20	—	—	28	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70
	0,15	10,0	23,0	34	0,50	0,80	1,10	1,30	1,45	1,70
	0,08	10,0	22,0	36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
	0,05	10,0	21,0	36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
3422 (Э350)	0,15	9,0	20,0	32	0,60	0,95	1,25	1,40	1,55	1,75
	0,08	8,5	19,0	32	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
	0,05	8,5	19,0	36	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
3423 (Э360)	0,15	8,0	19,0	26	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	7,5	17,0	28	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
3423	0,05	—	17,0	—	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
3424 (Э360А)	0,15	—	18,0	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	—	16,0	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,05	7,5	16,0	32	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
3425	0,15	—	17,0	—	1,10	1,35	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,08	—	15,0	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,05	—	15,0	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
3411	0,20	$P_{1,7/400}$	$P_{1,5/400}$	28	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70
		2,2	1,5							

Таблица 11-8

Магнитные свойства стали марок 1571 и 1572, ГОСТ 21427.3-75

Марка стали	Толщина, мм	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м							
		10	20	50	70	100	200	500	1000
1571	0,35	0,035	0,14	0,48	0,61	0,77	0,92	1,21	1,30
	0,20	0,03	0,10	0,38	0,58	0,66	0,90	1,18	1,29
1572	0,35	0,045	0,17	0,57	0,71	0,87	1,02	1,25	1,30
	0,20	0,04	0,14	0,48	0,62	0,74	0,92	1,20	1,29

применяются тонколистовые материалы из горячекатаной стали марки 1521 и холоднокатаных текстурованных сталей марок 3421—3425 меньшей толщины. Уменьшение толщины ленты обусловлено必要ностью уменьшения потерь и малого снижения проницаемости при повышенных частотах работы материала (табл. 11-6, 11-7) [11-6, 11-7].

В магнитных цепях, работающих на переменном токе частот от 50 до нескольких тысяч герц в широком диапазоне изменения амплитуды индукции (0,01—1,5 Тл), используются, как правило, горячекатаные стали 1571, 1572 (табл. 11-8).

При работе магнитных материалов в диапазоне частот 50—5000 Гц с определенными допустимыми потерями в качестве замены текстурованных кремнистых сталей могут быть использованы более дорогие железоникелевые сплавы марки 50Н, 45Н. Основное применение они нашли в аппаратуре связи в качестве магнитопроводов малогабаритных трансформаторов питания, деталей магнитных цепей, работающих в повышенном диапазоне частот без подмагничивания, для изготовления различного типа магнитопроводов, в том числе трансформаторов тока и напряжения промышленной частоты. Магнитные параметры сплавов марок

Таблица 11-9

Магнитные свойства сплавов с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения, ГОСТ 10160-75

Марка сплава	Вид продукции	Толщина, диаметр, мм	Класс	μ_r	$\mu_{r \max}$	H_c , А/м	B_s , Тл
50Н	Холоднокатаные ленты	0,05—0,08	I	2000	20 000	20	1,50
		0,10—0,15		2300	25 000	16	1,50
		0,20—0,25		2600	30 000	12	1,50
		0,35—0,50		3000	35 000	10	1,50
		0,80—1,00		3000	80 000	12	1,50
		1,50—2,50		2800	25 000	13	1,50
	Горячекатаные листы	3—22	—	2500	20 000	24	1,50
	Прутки	8—100	—	2500	20 000	24	1,50
	Холоднокатаные ленты	0,10—0,15	II	3000	30 000	14	1,50
		0,20—0,25		3500	35 000	12	1,50
		0,35—0,50		4000	45 000	10	1,50
		0,80—1,00		4000	40 000	10	1,50
		1,50—2,00		3000	35 000	12	1,50
		0,05—0,20	III	10 000	60 000	0,4	1,52
45Н	Холоднокатаные ленты	0,10—0,15	I	2000	20 000	24	1,50
		0,20—0,25		2500	23 000	20	1,50
		0,35—2,5		2800	25 000	16	1,50
	Горячекатаные листы	3—22	—	2000	18 000	24	1,50
	Прутки	8—100	—	2000	18 000	24	1,50

50Н и 45Н приведены в табл. 11-9. На рис. 11-18, 11-19 показаны основные кривые намагничивания сплава 45Н и зависимость потерь от максимальной магнитной индукции при различных частотах для сплава 50Н. Следует отметить, имея высокие значения B_s и $\mu_{r \max}$, низкое значение H_c , указанные материалы обладают очень серьезным недостатком — высокой чувствительностью магнитных свойств к механическим напряжениям.

сыщения, здесь качество аппаратуры зависит от относительной магнитной проницаемости и потерь на начальном участке кривой намагничивания.

Из электротехнических сталей для этих целей получили распространение горячекатаные стали марок 1561, 1562, работающие в звуковом диапазоне частот с амплитудой индукции 10^{-4} — 10^{-3} Тл (табл. 11-10).

Таблица 11-10

Сталь электротехническая тонколистовая, ГОСТ 21427.3-75

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м		
		20	40	80
1561	0,35—0,2	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
1562	0,35—0,2	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$

11-4. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАБОТЫ В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Магнитные материалы для элементов аппаратуры приема и передачи информации, магнитопроводов малогабаритных трансформаторов, дросселей, дефектоскопов, магнитных экранов и многих других элементов высокочувствительной аппаратуры, работающих в переменных полях высокой частоты, должны удовлетворять требованиям узкого гистерезисного цикла и большой крутизны $B(H)$ в слабых магнитных полях.

В отличие от силовых аппаратов, где основное внимание уделяется индукции и потерям на перемагничивание в области на-
22—288

На рис. 11-20 приведены зависимости максимальной индукции от действующего значения напряженности магнитного поля электротехнических сталей 1561, 1562 толщиной 0,2 мм, работающих на частотах 400 и 1000 Гц.

Таблица 11-11

Магнитные свойства сплавов с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых полях,
ГОСТ 10160-75

Марка сплава	Вид продукции	Толщина, Диаметр, мм	$\mu_{r \text{ нач}} \cdot 10^{-3}$			$\mu_{r \text{ max}} \cdot 10^{-3}$			$H_c, \text{ А/м}$			$B_s, \text{ Тл}$		
			I кл.	II кл.	III кл.	I кл.	II кл.	III кл.	I кл.	II кл.	III кл.	I кл.	II кл.	III кл.
79НМ	Холоднокатанные ленты	0,005	7	10	—	30	35	—	8,0	6,4	—	0,75	0,73	—
		0,01	14	16	20	60	90	120	5,6	3,2	2,4	0,75	0,73	0,73
		0,02	16	20	25	70	100	150	4,0	2,4	1,6	0,75	0,73	0,73
		0,05	16	20	30	90	120	200	3,2	1,6	1,2	0,75	0,73	0,73
		0,08	16	20	—	90	120	—	3,2	1,6	—	0,75	0,73	—
		0,1	20	22	30	120	150	200	2,4	1,2	1,2	0,75	0,73	0,73
		0,15	20	22	—	120	150	—	2,4	1,2	—	0,75	0,73	—
	Холоднокатанные листы и ленты	0,20—0,25	22	25	30	130	180	220	1,6	1,0	1,0	0,75	0,73	0,73
		0,35—1,0	22	30	—	150	220	250	1,6	1,0	—	0,75	0,73	—
		1,5—2,0	25	25	—	130	180	—	1,6	1,6	—	0,75	0,73	—
		2,5	22	—	—	130	—	—	1,6	—	—	0,75	—	—
80НХС	Холоднотянутая проволока	0,05—0,1	5	—	—	40	—	—	6,4	—	—	0,75	—	—
	Горячекатанные листы	3—22	20	—	—	80	—	—	3,2	—	—	0,75	—	—
	Прутки	8—100	20	—	—	80	—	—	3,2	—	—	0,75	—	—
	Прутки	8—100	20	—	—	80	—	—	3,2	—	—	0,75	—	—
80НХС	Холоднокатанные ленты	0,005	8	—	—	30	—	—	8,0	—	—	0,63	—	—
		0,01	14	—	25	50	—	90	5,6	—	3,2	0,63	—	0,63
		0,02	18	22	30	70	100	120	4,0	3,2	1,6	0,63	0,63	0,63
		0,05—0,08	20	30	40	90	150	200	3,2	1,6	1,0	0,63	0,63	0,63
		0,10	22	32	45	120	160	200	2,4	1,2	1,0	0,63	0,63	0,63
		0,15	22	32	—	120	160	—	2,4	1,2	—	0,63	0,63	—
		0,20—0,15	28	35	—	130	160	—	1,6	1,2	—	0,63	0,63	—
		0,35—0,5	35	35	50	150	200	250	1,2	1,0	0,8	0,63	0,63	0,63
		0,8—1,0	30	—	—	170	—	—	1	—	—	0,63	—	—
		1,5—2,5	25	—	—	150	—	—	1,2	—	—	0,63	—	—
80НХС	Горячекатанные листы	3—22	20	—	—	70	—	—	3,2	—	—	0,63	—	—
	Прутки	8—100	20	—	—	70	—	—	3,2	—	—	0,63	—	—

Ассортимент магнитных материалов, работающих на начальном участке технической кривой намагничивания, не ограничивается листовой электротехнической сталью.

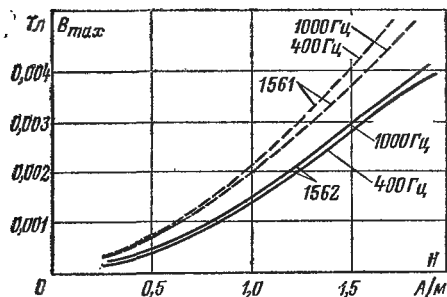


Рис. 11-20. Зависимость максимальной индукции от действующего значения напряженности поля сталей 1561, 1562 на частотах 400 и 1000 Гц.

Широкое распространение получили здесь высоконикелевые пермаллои марок 79НМ, 80НХС, 76НХД, 77НДМ, содержащие соответственно 79, 80, 76 и 77% никеля, легированные молибденом, ванадием, вольфрамом, хромом и медью (табл. 11-11). Легирование осуществляется с целью придания необходимой обрабатываемости изделий. На рис. 11-21, 11-22 приведены кривые намагничивания и зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля материалов, рекомендуемых для работы в слабых полях (79НМ, 80НХС) и пермаллоя 50НХС, значительно уступающего по магнитным характеристикам в данной области работы. Отметим, что каждый конкретный сплав применяется для работы на частоте, на которую он рассчитан. С ростом частоты проницаемость падает и тем сильнее, чем выше было ее значение в постоянном поле (рис. 11-23). Наряду с выпускаемыми согласно ГОСТ 10160-75 мате-

Таблица 11-12

Основные параметры никель-цинковых ферритов

Марка феррита	μ_r нач	μ_r max	H , А/м, при μ_r max	ТКМ, 10^{-6}C^{-1} при 20–70°C	H_c , А/м, при $H_{max}=800$ А/м	B_r , Тл	ρ , Ом·м
2000НН	1800–2400	7000	12	3–9	9	0,06	$1 \cdot 10^8$
1000НН	800–1200	3000	32	5–15	30	0,083	20
600НН	500–800	1600	56	6–15	40	0,17	10^2
400НН	350–500	800	80	5–15	68	0,087	10^3
200НН	130–250	300	160	4–10	96	0,096	10^3
100НН	80–120	1700	120	5–45	67	0,20	10^7
150ВЧ	130–170	350	640	± 4	$24(H_{max}=4000 \text{ А/м})$	0,17	10^3
100ВЧ	80–120	280	720	9	300	0,165	10^4
50ВЧ2	45–65	170	300	$-1,0 \div -9,0$	450	0,20	10^6
30ВЧ2	25–35	120	1200	± 35	720	0,16	10^5
20ВЧ	18–28	50	1600	± 10	650	0,046	10^4
300НН	280–350	600	240	35	96	0,13	10^5
200НН2	190–230	850	80	25	90	0,25	10^5
150НН1	135–160	—	—	—	80	0,29	10^5
90НН	80–95	—	—	—	220	0,29	10^5
60НН	50–65	540	560	50	320	0,30	10^3
55НН	50–70	—	—	—	540	0,24	10^5
35НН	27–35	—	—	—	720	0,28	10^3
10ВЧ1	9–14	40	3600	120	1700	0,78	10^3

риалами для работы в слабых магнитных полях используются сплавы 76НХД, 80НХ, 80НМ, 77НМД, 77НВ, 83НФ, 81НМА, 72НМДХ. Сплавы 76НХД, 80НХ обладают повышенной температурной стабильностью

40 мГн/м. Характерным свойством сплава 77НМД является низкое отношение μ_r max к μ_r нач, что имеет существенное значение в аппаратуре высокой точности. Низким коэффициентом амплитудной неустойчивости μ_r в малых полях, повышенным удельным сопротивлением обладают сплавы 83НФ и 77НВ. Эти показатели очень важны при изготовлении магнитопроводов высокочувствительной аппаратуры, работающей в переменных полях высокой частоты. Сплав

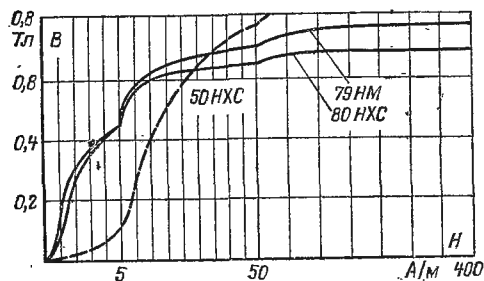


Рис. 11-21. Кривые намагничивания сплавов марок 79НМ, 80НХС, 50НХС.

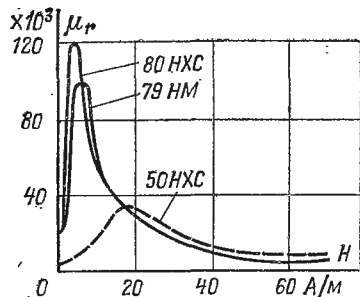


Рис. 11-22. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности поля сплавов марок 80НХС, 79НМ, 50НХС.

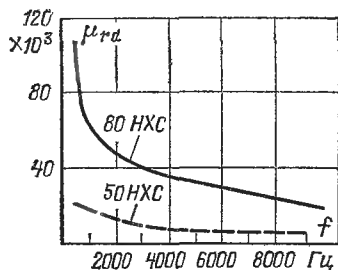


Рис. 11-23. Зависимость относительной магнитной проницаемости сплавов марок 50НХС и 80НХС от частоты.

81НМА обладает повышенной деформационной стабильностью и практически нулевой магнитострикцией, поэтому основное применение нашел в аппаратуре, подвергающейся механическим воздействиям. Повышенным значением μ_r и низкой точкой Кюри (100–120°С) обладает сплав 72НМДХ, нашедший применение в магнитостатических экранках с высокой степенью экранирования.

Особые требования предъявляются к материалам, работающим при очень высоких частотах. Эти материалы должны обладать большим электрическим сопротивлением, чтобы потери на вихревые токи были по возможности меньшими, а намагничен-

максимальной проницаемости в интервале температур $-60 \div +60^\circ\text{C}$. В аппаратуре особо высокой точности используются сплавы типа 80НМ, имеющие значения магнитной проницаемости в слабых полях 60–22*

Таблица 11-13

Основные параметры марганец-цинковых ферритов

Марка феррита	μ_r нач	μ_r max	H , А/м, при μ_r max	$T_{К\mu}$, 10^{-6} °С при 20—70 °С	H_c , А/м, при $H_{max}=800$ А/м	B_r , Тл	ρ , Ом·м
6000НМ	4800—8000	10 000	0,12	0,2—1,5	0,064	0,135	10^{-1}
4000НМ	3500—4800	7000	0,16	0,5—1,5	0,11	0,14	$5 \cdot 10^{-2}$
3000НМ	2700—3500	5200	0,24	1—2	0,096	0,10	$5 \cdot 10^{-2}$
2000НМ	1700—2500	3500	0,20	$-2 \div +4,5$	0,17	0,10	$5 \cdot 10^{-2}$
1500НМ	1200—1700	3000	0,32	$-1,1 \div +7,0$	0,21	0,15	$5 \cdot 10^{-2}$
1000НМ	800—1200	2000	0,8	$-0,5 \div +8,5$	0,22	0,086	$5 \cdot 10^{-1}$
2000НМ1	1700—2500	3500	0,32	$-0,1 \div +1,0$	0,21	0,10	5
1500НМ1	1200—1700	3000	0,32	$-0,1 \div +0,8$	0,20	0,080	5
1600НМ2	1200—1700	3000	0,32	$-0,5 \div +0,8$	0,26	0,030	5
1500НМ3	1200—1800	3000	0,48	0÷0,7	0,088	0,060	20
1000НМ3	800—1200	2000	0,8	0÷1,0	0,30	0,083	10
700НМ	550—850	2000	0,2	$-0,2 \div +1,2$	0,40	0,17	20
4000НМС	3300	5300	0,24	—	0,68	0,087	$5 \cdot 10^{-1}$
3000НМС	2500	4000	0,32	—	0,96	0,096	$5 \cdot 10^{-2}$
1100НМН	1200	1600	0,64	—	0,67	0,20	10^{-1}

ность устанавливалась с наибольшей скоростью. По своей природе такими материалами являются неметаллические магнитные материалы — ферромагнетики, к которым в первую очередь относятся ферриты. Удельное сопротивление их находится в пределах $5 \cdot 10^{-5}$ — 10^8 Ом·м (у металлов 10^{-7} Ом·м)

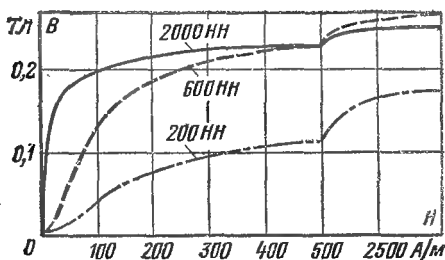


Рис. 11-24. Кривые намагничивания никель-цинковых ферритов марок 200НН, 600НН, 2000НН.

и в сильной степени, так же как и магнитные свойства, зависит от состава и структуры. Так, если у простых ферритов относительная начальная магнитная проницаемость не превышает 10, то у никель-цинковых ферритов можно получить $\mu_{r \text{ нач}}=1000$ (табл. 11-12). На рис. 11-24 показаны кривые намагничивания никель-цинковых ферритов марок 200НН, 600НН, 2000НН. Очевидным является широкий диапазон изменения магнитной проницаемости в зависимости от марки большого многообразия этого типа ферритов. У марганец-цинковых материалов (табл. 11-13) $\mu_{r \text{ нач}}$ достигает 3000. Общим их недостатком является сильная зависимость проницаемости от температуры. Одним из способов повышения температурной стабильности ферритов является добавление небольшого количества крупнозернистого феррита к основному цинковому с несколько меньшей точкой Кюри.

Увеличения магнитной проницаемости добиваются уменьшением магнитострикции, т. е. подбором смесанных ферритов с компонентами, обладающими магнитострикцией разного знака. Здесь же необходимо учитывать, что одновременно с увеличением проницаемости возрастает тангенс угла потерь. Поэтому следует учитывать конкретные требования, предъявляемые к материалу в том или ином случае.

Увеличить магнитную проницаемость можно также текстурованием ферромагнитных деталей. В этом случае феррит, раздробленный в мелкий порошок, прессуется в магнитном поле, приложенном в направлении предполагаемой текстуры. В результате получается деталь с требуемым направлением легкого намагничивания.

Обычно требованиями, определяющими выбор типа ферритов для этих целей, являются большая относительная начальная магнитная проницаемость, малый тангенс угла потерь δ , высокая добротность Q , большое электрическое сопротивление ρ . Так же как и у металлических материалов эти свойства в сильной степени определяются не только составом, но и технологией изготовления, температурой отжига, временем выдержки, атмосферой, в которой проводится отжиг, скоростью охлаждения и т. д.

Задолго до промышленного внедрения ферритов были разработаны магнитодиэлектрики как материалы, рассчитанные на работу при частоте выше 10 кГц. Практически невозможно установить границы применимости различных материалов, так как, например, даже на частотах выше 1 МГц наряду с ферритами можно использовать металлические материалы из тонкой ленты. На выбор оптимального материала влияют не только характеристики, но и технология изготовления деталей заданной формы, т. е. в конечном счете стоимость изготовления. С этой точки зрения наиболее подходящими являются магнитодиэлектрики — материалы, состоящие из ферромагнитных частиц раз-

Таблица 11-14

Параметры магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа

Марка порошка	μ_r нач	$\delta_r \cdot 10^3$, $1/\frac{A}{M}$	$\delta_B \cdot 10^3$, 1/Гц	$\delta_H \cdot 10^3$	ТК μ_r , $10^{-6} \frac{1}{^\circ C} \pm 100^\circ C$
P-10	10—11	0,25— 0,375	2—4	0,15— 0,25	150— 200
P-20	10—11	0,26— 0,30	0,5—3,5	0,05— 0,1	100— 150
P-100	9—10	0,125— 0,20	0,5—1,2	0,05— 0,1	50—100
Пс	9,5	0,140	2	0,2	+50÷ -50

Таблица 11-15

Параметры магнитодиэлектриков на основе альсифера

Марка	μ_r нач	$\delta_r \cdot 10^3$, $1/\frac{A}{M}$	$\delta_B \cdot 10^3$, 1/Гц	$\delta_H \cdot 10^3$	ТК μ_r , $10^{-6} \frac{1}{^\circ C}$	
					20—70° C	-60÷ +20° C
ТЧ-90	82—96	8,5	1000	3	-600	300—800
ТЧ-60	55—65	6,2	250	2	-400	100—500
ТЧК-65	50—55	6,2	250	2	-150÷+50	100—400
ВЧ-32	30—34	2,5	85	1,2	-250	200—350
ВЧК-22	20—24	1,5	12	1,2	-50÷+50	150
ВЧ-22	20—24	1,5	12	1,2	-200	—

мерами от 1 до 100 мкм, разделенных изолирующим веществом (жидкое стекло, синтетические смолы). Из-за внутреннего размагничивания частиц уменьшаются потери на вихревые токи, слабо изменяется проницаемость в полях до 2000 А/м, обеспечивается высокая стойкость к подмагничивающим полям, хорошая стабильность во времени и много других положительных факторов, трудно осуществляемых в материалах с другой структурой.

Наряду с карбонильным железом после открытия пермаллоев ведутся работы по изготовлению порошков из сплавов с высокой магнитной проницаемостью (молибденовый пермаллой). Широко распространены, например, сердечники из этого материала в США, где налажен их промышленный выпуск по стандартизированным значениями относительной проницаемости (125, 60, 26, 14) для своего диапазона частот (соответственно 15, 50, 75, 200 кГц).

В настоящее время работы по совершенствованию магнитодиэлектриков отошли на задний план в результате улучшения свойств ферритов. Повышение стабильности ферритов и снижение их чувствительности к внешним воздействиям (температура, время, подмагничивание) приводит к тому, что они полностью заменяют магнитодиэлектрики. Но хотя объем производства магнитодиэлектриков уменьшается, выпуск их еще продолжается ввиду простоты и низкой стоимости технологического процесса изготовления. Для этих материалов, работающих в

области слабых полей, различают потери на гистерезис, вихревые токи и последствие (магнитную вязкость), характеризующихся соответствующими коэффициентами потерь δ_r (м/А), δ_B (1/Гц) и δ_H [11-2, 11-18]. Параметры магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа и альсифера, выпускаемых промышленностью, приведены соответственно в табл. 11-14, 11-15.

11-5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА

В ряде устройств, например магнитных усилителей, бесконтактных реле, коммутационных дросселях, элементах вычислительной техники требуются материалы с очень узким гистерезисным циклом, большим коэффициентом прямоугольности, высокой

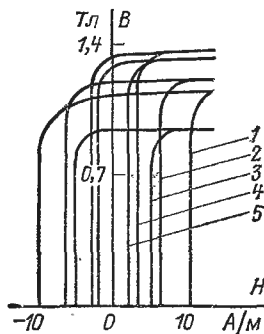


Рис. 11-25. Петли гистерезиса сплавов с ППГП.

1 — 50НП; 2 — 65НП;
3 — 34НКМП; 4 —
40НКМПЛ; 5 —
35НКХСП.

проницаемостью, низкой электрической проводимостью и большим коэффициентом квадратности. При этом для коммутационной аппаратуры магнитные материалы должны иметь большое значение B_r , резкий спад на петле магнитного гистерезиса, малую H_c , большую скорость изменения индукции.

От магнитных материалов для бесконтактных реле и запоминающих устройств требуются большой коэффициент прямоугольности α_p , большое приращение индукции при перемагничивании и минимальное время переключения t_p .

Материалы, используемые в магнитных усилителях, должны обладать α_p , близким к единице, а для обеспечения большого коэффициента усиления петля гистерезиса должна иметь крутой спад. Указанным требованиям удовлетворяют сплавы типа пермаллой с кристаллографической (50НП, 47НМП) и магнитной текстурой (65НП, 68НМП, 37НКДП, 34НКМП) и прямоугольным циклом гистерезиса ($\alpha_p = 0,85 \div 0,98$)*. Индукция насыщения у них 1,2—1,5 Тл (табл. 11-16). На рис. 11-25 для сравнения

* Первая цифра пермаллоевых сплавов указывает на процентное содержание никеля; буква П обозначает, что сплав имеет прямоугольную петлю гистерезиса. Средние буквы указывают на наличие легирующих элементов: М — молибден, Х — хром, К — кобальт и др.

Таблица 11-16

Магнитные свойства холоднокатаной ленты
сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса,
ГОСТ 10160-75

	Толщина, мм	Класс	$\mu_r \max$	H_c , А/м	B_r , Тл	α_H при 800 А/м
50НП	0,005	I	15 000	40	1,50	0,80
	0,01		20 000	32	1,50	0,83
	0,02		40 000	20	1,50	0,85
	0,05—0,1		40 000	18	1,50	0,85
	0,01	II	35 000	20	1,50	0,87
	0,02		60 000	15	1,50	0,92
	0,05—0,1		60 000	15	1,50	0,90
	0,01	III	60 000	15	1,52	0,91
	0,02		75 000	13	1,52	0,94
	0,05		80 000	11	1,52	0,94
	0,005	I	15 000	80	1,50	0,90
	0,01		35 000	24	1,50	0,92
34НҚМП	0,02		40 000	16	1,50	0,90
	0,05		60 000	12	1,50	0,87
	0,1		100 000	8	1,50	0,85
	0,2—0,5		120 000	6,4	1,50	0,85
	0,01	II	40 000	16	1,50	0,92
	0,02		65 000	11	1,50	0,94
	0,05		75 000	10	1,50	0,92
	0,1		125 000	6,4	1,50	0,90
	0,2—0,5		180 000	6,4	1,50	0,90
35НҚХСП	0,005	I	15 000	80	1,30	0,90
	0,01		30 000	24	1,30	0,85
	0,02		40 000	16	1,30	0,85
	0,05		60 000	12	1,30	0,85
	0,1		100 000	8	1,30	0,80
	0,2—0,5		120 000	6,4	1,30	0,80
	0,01	II	50 000	16	1,30	0,92
	0,02		80 000	8	1,30	0,92
	0,05		20 000	4,8	1,30	0,92
	0,1—0,5		30 000	4,0	1,30	0,92
40НҚМП	0,01	I	100 000	6,4	1,35	0,93
	0,02		200 000	4,0	1,35	0,93
	0,05		300 000	3,2	1,35	0,92
	1,10		400 000	2,4	1,35	0,93
	0,01	II	200 000	4,8	1,35	0,94
	0,02		400 000	2,4	1,35	0,94
	0,05		500 000	1,6	1,35	0,94
	0,10		600 000	1,6	1,35	0,94
68НМП	0,02	I	100 000	8,0	1,15	0,90
	0,05		200 000	5,6	1,15	0,90
	0,1—0,2		220 000	4,0	1,15	0,90
	0,02	II	200 000	4,0	1,15	0,90
	0,05		400 000	3,2	1,15	0,92
	0,1—0,2		600 000	2,4	1,15	0,93
	0,02	III	300 000	3,2	1,15	0,92
	0,05		600 000	2,4	1,15	0,93
	0,1—0,2		800 000	1,6	1,15	0,93
65НП	0,02	I	70 000	6,4	1,30	0,90
	0,05		100 000	3,2	1,30	0,90
	0,10		200 000	2,8	1,30	0,90
	0,20		250 000	2,4	1,30	0,90
	0,35—0,5		300 000	2,4	1,30	0,90

приведены петли магнитного гистерезиса ряда сплавов, обладающих различной степенью прямоугольности, достаточно широкого диапазоном значений B_r и H_c . Наиболее освоенными промышленностью являются сплавы 50НП и 50НПУ с кубической текстурой, имеющие $\mu_r \max = (3-4)10^4$, $\alpha_H = 0,85 \div 0,98$, $B_s = 1,5 \div 1,6$ Тл и обеспечивающие наилучшие свойства при прохождении магнитного потока вдоль, поперек листа и перпендикулярно прокатке. За рубежом 50%-ные сплавы никеля с кубической структурой распространены широко. Следует иметь в виду, что хотя эти сплавы хорошо поддаются обработке давлением, резке и сварке, они являются чувствительными к механическим напряжениям, которые могут приводить к необратимому ухудшению магнитных свойств. Преимущественное применение сплавы типа 50НП нашли в магнитопроводах магнитных усилителей, реакторов мощных механических выпрямителей, трансформаторов аппаратуры связи. Сплав с повышенной $\mu_r \max$ применяется в качестве сердечников аппаратуры магнитной записи и особо точной аппаратуры связи.

Характерной особенностью сплавов 65НП, 68НМП, 37НҚДП является высокая $\mu_r \max = (1 \div 5) \cdot 10^5$, прямоугольная петля гистерезиса ($\alpha_H = 0,9 \div 0,98$). Согласно ГОСТ 10994-64 [11-10] сплав 65НП в новых разработках применять не рекомендуется из-за большой частотной зависимости его магнитных свойств, высоких удельных потерь. Применяются сплавы этой подгруппы в основном для магнитопроводов бесконтактных магнитных элементов высокой чувствительности и точности.

Более высоким удельным сопротивлением при прочих равных условиях обладают сплавы 34НҚМП, 35НҚХСП, 40НҚМПЛ. Этот материалам свойственна одноосная анизотропия, обеспечивающая наивысший уровень магнитных свойств вдоль указанной оси. Широкое применение сплавы этой подгруппы нашли в магнитопроводах бесконтактных магнитных элементов высокой чувствительности, работающих при повышенных частотах.

Для изготовления магнитопроводов магнитных усилителей используются сплавы 77НМДП, 79НМ, 80Н2М (толщина ленты 0,01—0,02 мм), обладающие относительно высокими значениями $\mu_r \max \approx (5 \div 10)10^4$, коэффициентом прямоугольности $\alpha_H = 0,7 \div 0,85$, малым коэффициентом переключения S_w в импульсных полях ($30 \div 140$) А·мкс/м (табл. 11-17).

Для изготовления малогабаритных ленточных магнитопроводов переключающих устройств (логические элементы, регистры сдвига, триггерные схемы) применяются сплавы микронных толщин (0,5—1 мкм). Высокой прямоугольностью петли гистерезиса и малым временем перемагничивания в импульсных полях обладают типовые сплавы 79НМ и 77НМД и специально разработанные сплавы для тончайших лент 80Н2М и 80НЮ [11-12]. Контролируемыми

Таблица 11-17
Магнитные свойства сплавов толщиной 0,003 мм с прямоугольной петлей гистерезиса, ГОСТ 10160-75

Марка сплава	Вид продукции	H_c , А/м	B_r , Тл	α_H при $5H_c$
79НМП	Холоднокатаные ленты	9,6	0,6	0,90
77НМДП	То же	7,2	0,5	0,90

параметрами в постоянных полях у них являются: максимальная индукция B_{max} , соответствующая H_{max} ; остаточная индукция B_r ; коэрцитивная сила H_c , коэффициент прямоугольности α_H , коэффициент «старта» $H_{ст}/H_c$; коэффициент «финиша» $H_{ф}/H_c$. Напряженности поля старта $H_{ст}$ и финиша $H_{ф}$

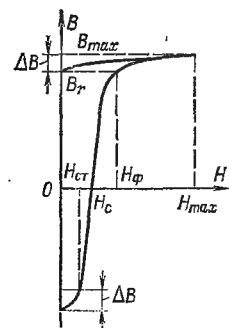


Рис. 11-26. Характеристики и параметры магнитных материалов в импульсном режиме перемagnetизации.

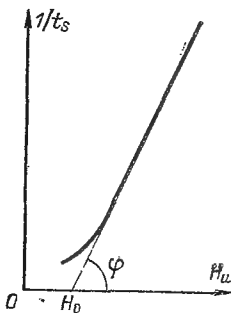


Рис. 11-27. К определению порогового поля импульсных сердечников.

ем является низкая точка Кюри и, как следствие, большая температурная нестабильность магнитных свойств. Наибольшее распространение получили ферриты на основе систем $MgO-MnO-Fe_2O_3$.

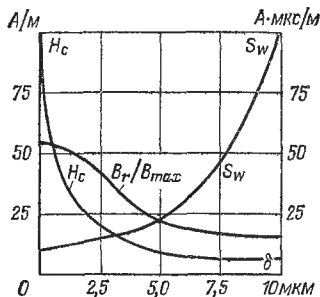


Рис. 11-28. Зависимость коэффициента прямоугольности, коэффициента переключения и коэрцитивной силы ленточных сердечников от толщины ленты.

В табл. 11-19 приведены основные статические параметры нормализованных марок ферритов с ППГ.

Таблица 11-18
Нормируемые магнитные свойства сплавов 79НМ, 77НМД, 80Н2М микронных толщин

Марка сплава	Толщина, мм	H_c , А/м	H_{ϕ}/H_c	B_r , Тл	α_H , %	$H_{ст}/H_c$	S_w , А·мкс/м
		Не более	Не менее	Не менее	Не менее	Не менее	Не менее
		79НМ	77НМД	80Н2М			
	3	9,6	—	0,6	90	—	—
	30	7,2	—	0,5	90	—	—
	20	24	2,0	—	93	0,8	32

Таблица 11-19
Основные параметры ферритов с ППГ

Марка феррита	Коэрцитивная сила H_c , А/м	B_r , Тл	$H_{ст}/H_c$	ТК H_c , °С при 20–70°С
0,12ВТ	$9,6 \pm 15\%$	$0,2 \pm 15\%$	0,7	0,013
0,16ВТ	$12,8 \pm 15\%$	$0,2 \pm 15\%$	0,72	0,012
0,27ВТ	$21,6 \pm 15\%$	$0,2 \pm 15\%$	0,72	0,013
0,3ВТ	$24 \pm 15\%$	$0,21 \pm 15\%$	0,7	0,008
0,37ВТ	$29,6 \pm 15\%$	$0,14 \pm 15\%$	0,7	0,01
0,44ВТ	$35,2 \pm 15\%$	$0,16 \pm 15\%$	0,7	0,008
0,7ВТ	$56 \pm 15\%$	$0,23 \pm 15\%$	0,7	0,007
0,9ВТ	$72 \pm 10\%$	$0,25 \pm 15\%$	0,8	0,006
1,3ВТ	$104 \pm 10\%$	$0,23 \pm 15\%$	0,8	0,006
1,5ВТ	$120 \pm 10\%$	$0,22 \pm 15\%$	0,75	0,005
1,75ВТ	$140 \pm 10\%$	$0,21 \pm 15\%$	0,75	0,005
2ВТ	$160 \pm 10\%$	$0,18 \pm 15\%$	0,8	0,006

Вспомогательные (справочные) характеристики этих же марок ферритов, которые используются при выборе материала для конкретных целей, приведены в табл. 11-20.

определяются, как показано на рис. 11-26. Свойства сплавов в импульсных полях характеризуются временем перемagnetизации (коэффициентом переключения S_w) и пороговым полем H_0 , определяемыми по характеристике $1/t_s = f(H_n)$, где t_s — время перемagnetизации; H_n — напряженность импульсного поля (рис. 11-27). Связь указанных величин определяется выражением

$$S_w = t_s (H_n - H_0) = \text{ctg } \varphi.$$

Основные свойства указанных сплавов приведены в табл. 11-18.

По мере уменьшения толщины ленты наблюдается увеличение H_c , α_H и R_s , а также уменьшение $\mu_{тв}$ и $\mu_{тmax}$ (рис. 11-28).

Значительно позже металлических материалов появились ферриты с ППГ. Однако объем их внедрения в настоящее время превзошел производство металлических сплавов из экономических соображений. Высокое удельное сопротивление дает возможность изготовления ферритовых деталей в виде монолита. Низкая индукция насыщения ферритов не играет существенной роли при использовании их в запоминающих устройствах с ферромагнетиками. Ограничени-

Таблица 11-20

Вспомогательные параметры ферритов с ППГ

Марка феррита	α_H	TK H_{CT} , °C—1		TK B_p , 10 ⁻² °C—1		Точка Кюри, °C, не менее	H_0 , А/см, не более	S_w , А·мкс/м, не более	ρ , Ом·м
		—60÷+20° C	+20÷+70° C	—60÷+20° C	+20÷+70° C				
0,12BT	0,91	0,02	0,018	55	74	115	0,56	28	6·10 ⁴
0,16BT	0,93	0,018	0,012	45	60	135	0,56	40	5·10 ²
0,27BT	0,90	0,02	0,014	60	65	110	0,40	36	2·10 ³
0,3BT	0,93	0,01	0,009	40	45	150	0,96	48	—
0,37BT	0,93	0,014	0,01	40	45	145	0,96	48	1·10 ³
0,44BT	0,93	0,01	0,009	35	35	180	1,44	44	2·10 ²
0,7BT	0,93	0,01	0,007	25	30	240	1,6	44	2·10 ²
0,9BT	0,92	0,008	0,006	25	25	235	1,36	48	2·10 ²
1,3BT	0,91	0,008	0,007	25	25	250	1,6	52	25·10 ²
1,5BT	0,91	0,007	0,006	25	30	250	1,72	52	5·10 ²
1,75BT	0,90	0,007	0,006	20	25	270	2,0	48	1·10 ³
2BT	0,90	0,007	0,006	30	30	260	2,08	44	5·10 ⁴

Основным видом изделий из ферритов с ППГ, выпускаемых промышленностью, являются торондальные магнитопроводы. Рекомендации по выбору материала магнитопровода весьма условны из-за большого разнообразия устройств и требований к ним. Как правило, для магнитопроводов запоминающих устройств рекомендуется использовать высококоэрцитивные ферриты марок 0,9BT; 1,3BT; 1,5BT; 1,75BT; 2BT (число в начале обозначения соответствует коэрцитивной силе в эрстедах). Объясняется это стремлением повысить быстродействие за счет уменьшения времени перемагничивания t_s . Поскольку коэффициент переключения S_w для всех ферритов одинаков, а H_c noticeably отличается от H_0 , то согласно выражению

$$t_s = \frac{S_w}{H - H_0}$$

время перемагничивания уменьшается с увеличением H_c .

В последние годы разработаны новые термостабильные ферриты с ППГ для микромагнитопроводов, практически не изменяющие свои параметры в диапазоне температур —60÷+80° C (табл. 11-21).

Таблица 11-21

Параметры термостабильных ферритовых микросердечников

Марка феррита	H_c , А/м	B_r , Тл	S_w , А·мкс/м	α_H
M100П	175	0,23—0,25	40—60	0,91—0,92
M101П	190	0,23—0,24	35—55	0,90—0,92
	260			
	360			
M102П	130	0,2	70	0,90—0,92

11-6. МАГНИТНО-МЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В телефонии, измерительной технике и радиотехнике часто требуются материалы с постоянной проницаемостью при малых намагничивающих полях, высоким приращением магнитной индукции при однополярном намагничивании, с повышенным значением проницаемости и удельного сопротивления, высокой индукцией насыщения. Материалы эти нашли широкое применение для сердечников катушек постоянной индуктивности, дросселей фильтров, широкополосных и импульсных трансформаторов, аппаратуры связи звуковых и высоких частот, магнитопроводов трансформаторов питания, магнитных усилителей, сердечников и полюсных наконечников электромагнитов.

Магнитные свойства некоторых сплавов (пермивары, изопермы) с постоянной μ_r в диапазоне полей до 10⁴ А/м приведены в табл. 11-22.

Большое распространение для изготовления импульсных и широкополосных трансформаторов получили ферриты марок 1500НМ1, 1000НМ3, 1100НМ1, 1000НН1, 350НН1, 300НН1 и сплавы типа 79НЗМ и 68 НМ, обладающие высокими значениями проницаемости и приращений индукции при однополярном намагничивании, малым отношением B_r/B_s . Параметры используемых ферритов и сплавов для импульсных трансформаторов приведены соответственно в табл. 11-23, 11-24. На рис. 11-29 приведены петли гистерезиса сплавов 79НЗМ и 68НМ при различных режимах термообработки [11-11].

Особые требования предъявляются к материалам для реле. Здесь необходимо иметь высокую индукцию насыщения для надежного срабатывания; низкую B_r , а следовательно, и H_c для надежного отпуска; высокое удельное сопротивление для

Таблица 11-22

Магнитные свойства холоднокатаной ленты сплавов с низкой остаточной индукцией и постоянством магнитной проницаемости, ГОСТ 10160-75

Марка	Толщина, мм	μ_r нач		μ_r max	μ_r нач	α_{μ} при 800 А/м	ТК μ_r , 10 ⁻² °C ⁻¹
		кл. I	кл. II				
47НК	0,01—0,1	900	1100	1,15	0,05	0,06	
47НКХ	0,02—0,1	1500	—	1,2	0,05	0,03	
64Н	0,01—0,1	2000	2200	1,2	0,07	0,06	
40НКМ	0,01—0,1	1800	—	1,2	0,07	—	

Таблица 11-23

Электромагнитные параметры ферритов для импульсных трансформаторов

Марка феррита	Относительная импульсная проницаемость $\mu_{гн}$ при $\tau = 3$ мкс $f = 5$ кГц	Изменение $\mu_{гн}$, %, в интервале температур —60 ÷ +85° С	Рекомендуемый режим работы		
			H_H , А/м	f , МГц, не более	t_{Σ} , мкс, не менее
1500НМ1	1700	±20	80	0,1	1,0
1000НМ3	1400	±15	80	0,1	1,0
1100НМ1	1100	±15	80	0,1	1,0
1000НН1	1000	0 ÷ +30	64	1	0,1
350НН1	360	+30 ÷ -45	80	1	0,1
300НН1	300	±30	80	1	0,1
300ННН1	300	±10	240	—	—
300ННН1	300	±10	80	1	0,1

Таблица 11-24

Магнитные параметры холоднокатаной ленты сплавов с высокой магнитной проницаемостью при однополярном намагничивании, ГОСТ 10160-75

Марка сплава	Толщина, мкм	Относительная импульсная проницаемость $\mu_{гн}$		σ_H при 800 А/м	ТК $\mu_{гн}$, 10 ⁻⁴ °C ⁻¹ в интервале —60 ÷ +60° С
		при 20 А/м	при 80 А/м		
79НЗМ	5 10 20 20	5000 7000 8000 —	— — — 6000	0,45 0,30 0,25 0,20	25 25 25 25
68НМ	—	—	—	—	—

Таблица 11-25

Магнитные параметры холоднокатаной ленты сплава 50НХС, ГОСТ 10160-75

Класс	Толщина, мм	μ_r нач	μ_r max	H_C , А/м	B_{Σ} , Тл
I	0,005	1000	8 000	56	1,00
	0,01	1300	10 000	40	1,00
	0,02	1500	15 000	20	1,00
	0,05—0,08	2000	20 000	16	1,00
	0,1—0,15	2500	25 000	13	1,00
	0,2—0,25	3000	28 000	10	1,00
	0,35—0,5	3200	30 000	8	1,00
	0,8—1	3000	20 000	10	1,00
II	0,02—0,05	3000	25 000	12	1,00
	0,1—0,25	3100	28 000	10	1,00
	0,35—0,5	3500	35 000	8	1,00

Таблица 11-26

Магнитные свойства холоднокатаных сплавов с высокой индукцией технического насыщения, ГОСТ 10160-75

Марка сплава	Вид продукции	Класс	Толщина или диаметр, мм	Индукция, Тл, при напряженности поля, А/м			Удельные потери, Вт/кг			H_C , А/м	μ_r
				400	2500	15 000	$P_{1,5/400}$	$P_{1,8/400}$	$P_{2,0/400}$		
27КХ	Листы и ленты	I	0,2 0,35 0,7	— — —	1,8 1,8 1,8	2,15 2,15 2,15	80 110 —	— — —	— — —	— — —	— — —
	Прутки и поковки		75—100	—	1,75	2,05	—	—	—	—	—
49К2ФА	Ленты и листы	I	0,1 0,2	— —	2,2 2,2	— —	— —	— —	— —	140 120	5500 5500
		II	0,05 0,1 0,15—0,2 0,25—0,7	1,8 1,8 1,85 1,85	2,1 2,2 2,2 2,2	— — — —	— — — —	25 35 39 —	30 45 55 —	40 80 48 48	— — — —
			—	—	—	—	—	—	—	—	—
		III	0,1	2,0	2,2	—	—	25	30	30	—
49КФ	Прутки и поковки	I	10—80	—	1,9	2,1	—	—	—	160	—
		II	10—80	—	2,0	2,2	—	—	—	160	—
49К2Ф	Ленты и листы	I	0,2	—	—	2,25	—	—	—	160	—
		II	0,2	—	—	2,25	—	—	—	160	700 при 0,8 А/м

снижения времени срабатывания. Хотя совместить все требования в одном материале трудно, широкое распространение здесь нашли сплавы типа 50НХС. Магнитные свойства сплава на этой основе приведены в табл. 11-25 (ГОСТ 10160-75).

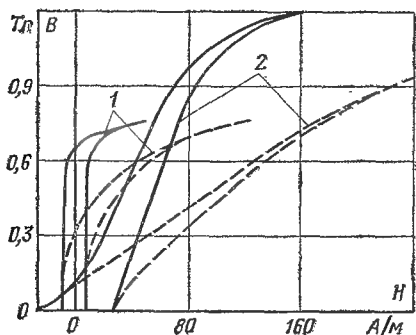


Рис. 11-29. Петли гистерезиса сплавов марок 79НЗМ(1) и 68НМ(2) при различных режимах термообработки.

— быстрое охлаждение; --- медленное охлаждение.

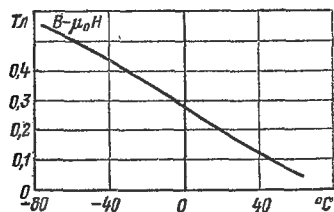


Рис. 11-30. Усредненная термомагнитная характеристика сплава марки 32НХЮ.

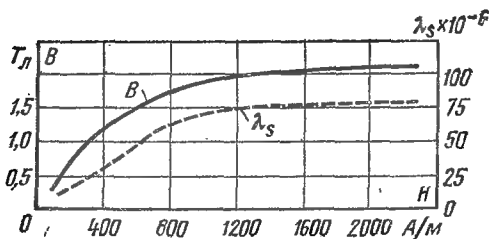


Рис. 11-31. Усредненные зависимости индукции и коэффициента магнитострикции от напряженности магнитного поля сплава марки 50КФ.

При построении магнитных систем микрофонов, магнитоэлектрических приборов, осциллографов и т. п., используются материалы, называемые пермэндором. Индукция насыщения этого материала составляет 2,4 Тл. Отличительной особенностью пермэндора является то, что уже в полях 500—1000 А/м индукция в нем значительно превосходит индукцию всех других материалов (см. рис. 11-5). Магнитные свойства материалов с высокой индукцией насыщения ре-

гламентируются ГОСТ 10160-75 (табл. 11-26).

В некоторых случаях требуются термозависимые магнитные материалы. Например, при изменении температуры изменяется индукция постоянных магнитов в измерительных приборах, счетчиках. В результате неизбежны искажения показаний этих приборов. Для компенсации температурной погрешности в этих случаях постоянный магнит шунтируется термомагнитным сплавом. Хорошими термомагнитными свойствами обладают сплавы никеля с медью (30—40% Cu, остальное — никель), называемые кальмаллоями. Характерной особенностью для термомагнитных сплавов является линейная зависимость индукции от температуры. На рис. 11-30 представлена усредненная зависимость $(B - \mu_0 H)$ сплава 32НХЮ (ТУ14-1-331-72 [11-12]) от температуры при напряженности постоянного магнитного поля 6000—16 000 А/м.

Для получения мощных механических колебаний звуковой и ультразвуковой частоты используются магнитострикционные материалы. На их основе строятся магнитострикционные генераторы, элементы ультразвуковой аппаратуры в гидроакустике, линии задержки, приборы для определения глубины моря (эхолот), механические дробилки и др. Основным магнитным материалом здесь является сплав железа с 14% алюминия, никель и сплав на основе Fe—Co (50% Co). Марки магнитострикционных сплавов НП-2-Т, 50КФ, 14НЮ регламентируются техническими условиями [11-12]. На рис. 11-31 представлены усредненные зависимости индукции и коэффициента магнитострикции λ_s от напряженности магнитного поля сплава 50КФ.

11-7. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Магнитно-твердые материалы после намагничивания должны создавать внешние постоянные поля, по возможности нечувствительные к различным возмущающим факторам. Необходимыми условиями здесь являются высокое значение остаточной индукции, коэрцитивной силы, малая проницаемость возврата и большой коэффициент выпуклости. Одним из основных оценочных критериев качества МТМ является энергетическое произведение $(BH)_{max}$, зависящее как от B_r и H_c , так и от характера кривой размагничивания, оцениваемого коэффициентом выпуклости β

$$\beta = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c}.$$

В существующих технических МТМ этот коэффициент находится в пределах 0,25—0,75. Поведение материала в динамическом режиме работы характеризует относительная проницаемость возврата, определяемая как тангенс угла наклона к оси H прямой,

соединяющей вершины цикла возврата (см. рис. 11-4). Чем больше μ_r воэв, тем чувствительнее материал к дестабилизирующим факторам.

Основной целью при разработке МТМ является повышение удельной магнитной

наль и альни. Сплавы являются дисперсионно-твердеющими. Высокая H_c обеспечивается малыми размерами кристаллов (близкими к однодоменным) и высокой анизотропией формы их. Магниты из этих сплавов применяются в электродвигателях, электро-

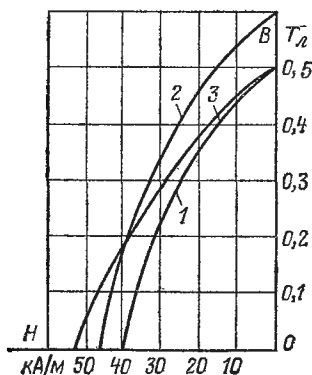


Рис. 11-32. Кривые размагничивания магнитно-твердых сплавов.

1 — ЮНД4; 2 — ЮНД8; 3 — ЮНД12.

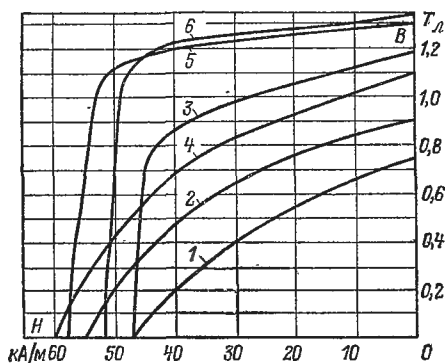


Рис. 11-34. Кривые размагничивания магнитно-твердых сплавов.

1 — ЮНДК15; 2 — ЮНДК18; 3 — ЮНДК24; 4 — ЮНДК24Т2; 5 — ЮНДК25БА; 6 — ЮНДК25А.

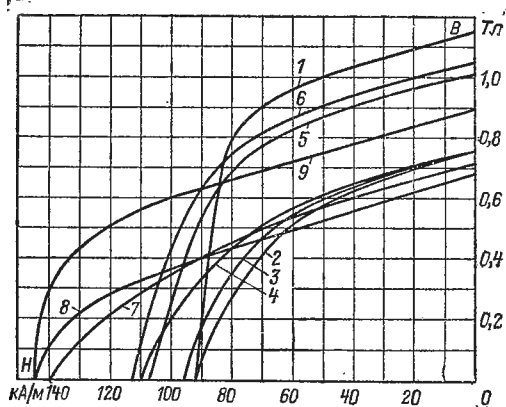


Рис. 11-33. Кривые размагничивания магнитно-твердых сплавов.

1 — ЮНДК31ТЗБА; 2 — ЮНДК34Т5; 3 — ЮНДК35Т5Б; 4 — ЮНДК35Т5; 5 — ЮНДК35ТБА; 6 — ЮНДК35ТБАА; 7 — ЮНДК38Т7; 8 — ЮНДК40Т8; 9 — ЮНДК40Т8АА.

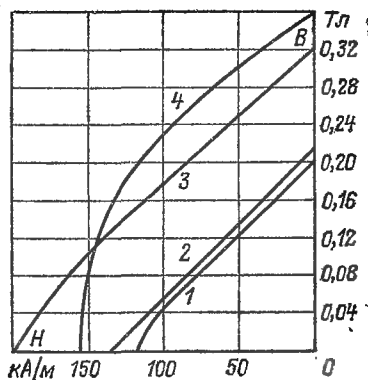


Рис. 11-35. Кривые размагничивания бариевых ферритов.

1 — 0,7БИ; 2 — 1БИ; 3 — 2БА; 4 — 3БА.

энергии, позволяющей при прочих равных условиях значительно уменьшать объем и массу конструктивных элементов различных устройств.

Большое распространение для изготовления постоянных магнитов получили литые сплавы на основе систем Fe-Co-Ni-Al (типа ЮНДК), имеющие $H_c = 40 \div 200$ кА/м и $(BH)_{max} = 7 \div 80$ кДж/м³ при $B_r = 1,35 \div 0,65$ Тл. На рис. 11-32 — 11-34 приведены кривые размагничивания различных марок сплавов этого типа. Зарубежными аналогами являются сплавы типа альнико, тико-

измерительных, радиотехнических и других приборах. В табл. 11-27, 11-28 приведены параметры МТМ на железо-никель-алюминиевой основе и прутков из легированной магнитно-твердой стали согласно ГОСТ 17809-72 и ГОСТ 6862-71 [11-12, 11-13].

Большой удельный вес выпуска постоянных магнитов падает на производство магнитов из бариевых ферритов, имеющих $H_c = 160 \div 200$ кА/м, $B_r = 0,2 \div 0,4$ Тл $(BH)_{max} = 6,0 \div 25$ кДж/м³. Кривые размагничивания их приведены на рис. 11-35. Широкое использование бариевых магнитов объясняется неадекватностью и дешевизной исходных материалов. Параметры основных марок изотропных нетекстурованных и ани-

Таблица 11-27
Прутки из легированной магнитно-твердой стали,
ГОСТ 6862-71

Марка стали	H_c , А/м	B_r , Тл
	Не менее	
EX3	4775	0,95
EB6	4775	1,00
EX5K5	7162	0,85
EX9K15M2	11 937	0,80

Таблица 11-28
Материалы магнитно-твердые литые,
ГОСТ 17809-72

Марки сплавов	$(BH)_{max}$, кДж/м ³	H_c , кА/м	B_r , Тл	Отношение B/H в точке $(BH)_{max}$, Тл/кА/м
	Не менее			
ЮНД4	7,2	40	0,50	12,0—16,0
ЮНД8	10,2	44	0,60	13,0—16,0
ЮНТС	8,0	58	0,43	7,0—10,0
ЮНДК15	12,0	48	0,75	15,5—18,0
ЮНДК18	19,4	55	0,90	15,0—20,0
ЮНДК18С	28	44	1,10	22,0—28,0
ЮН13ДК24С	36	36	1,30	30,0—33,0
ЮН13ДК24	36	40	1,25	25,0—27,5
ЮН14ДК24	35	48	1,20	20,0—22,0
ЮН15ДК24	36	52	1,15	15,0—17,5
ЮН14ДК24Т2	30	60	1,10	16,0—19,0
ЮН13ДК25А	56	44	1,40	27,5—30,0
ЮН14ДК25А	56	52	1,35	24,0—25,0
ЮН13ДК25БА	56	48	1,40	26,5—27,5
ЮН14ДК25БА	56	58	1,30	21,5—24,0
ЮН15ДК25БА	56	62	1,25	16,5—21,5
ЮНДК31Т3БА	64	92	1,15	11,0—14,0
ЮНДК34Т5	28	92	0,75	8,0—11,0
ЮНДК35Т5Б	32	96	0,75	8,0—10,0
ЮНДК35Т5	36	110	0,75	7,0—8,0
ЮНДК35Т5БА	72	110	1,02	8,0—9,0
ЮНДК35Т5АА	80	115	1,05	8,0—9,0
ЮНДК38Т7	36	135	0,75	4,5—5,5
ЮНДК40Т8	36	145	0,70	3,5—4,5
ЮНДК40Т8АА	64	145	0,90	4,0—5,0

Таблица 11-29
Магнитные свойства бариевых ферритов

Марка феррита	B_r , Тл	H_c , кА/м	Произведение $(BH)_{max}$, кДж/м ³
0,7 БИ	0,18—0,21	110—130	6—7
1БИ	0,19—0,22	130—140	7—10
2БИ	0,3—0,35	180—230	16—23
3БА	0,36—0,4	130—140	24—25

Таблица 11-30
Магниты металлокерамические постоянные,
ГОСТ 13596-68

Марка магнитов	B_r , Тл	H_c , кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м ³	B_d , Тл	H_d , кА/м
ММК1	0,60	24	6	0,35	17
ММК2	0,48	39	7	0,30	23
ММК3	0,52	44	8	0,30	27
ММК4	0,55	40	9	0,30	30
ММК5	0,60	44	9,4	0,35	27
ММК6	0,65	44	10	0,40	25
ММК7	0,95	44	21	0,60	35
ММК8	1,10	40	28	0,80	35
ММК9	0,75	80	24	0,45	54
ММК10	0,80	100	30	0,53	57
ММК11	0,70	128	32	0,40	80

зотропных текстурованных бариевых ферритов приведены в табл. 11-29.

На рис. 11-36 приведены кривые размагничивания, а в табл. 11-30 представлены основные параметры металлокерамических постоянных магнитов, выпускаемых отечественной промышленностью согласно ГОСТ 13596-68 [11-15].

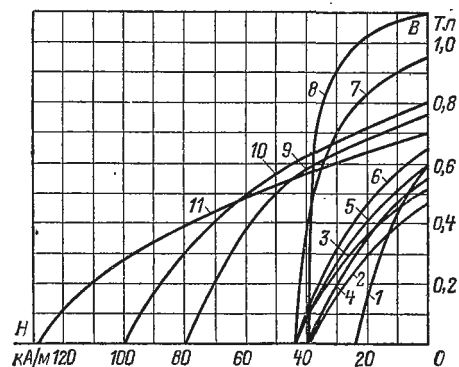


Рис. 11-36. Кривые размагничивания металлокерамических магнитов.

1—11 — ММК1—ММК11.

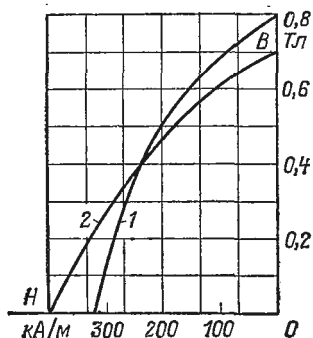


Рис. 11-37. Кривые размагничивания платинокобальтовых сплавов.

1 — ПЛК76; 2 — ПЛК78.

Из деформируемых высококоэрцитивных сплавов наиболее высокой H_c (до 430 кА/м) обладают кобальтплатиновые сплавы и кристаллические образцы, вырезанные из монокристаллов ($H_c=560$ кА/м). Высокая пластичность кобальтплатиновых сплавов позволяет изготавливать из них детали практически любой конфигурации. Высокая стоимость этих материалов ограничивает применение в широких областях. В нашей стране изготавливают кобальтплатиновые сплавы типа ПЛК-76 и ПЛК-78 согласно ЦМТУ 07-77-67 в виде прутков и ЦМТУ 07-82-68 в виде полос (рис. 11-37). Техническими условиями регламентируется состав: 76,5—79,5% Pt, остальное Co. Максимальной H_c (до 430 кА/м) обладает сплав

Таблица 11-31

Железokoбальтванадиевые магнитно-твердые сплавы, ГОСТ 10994-74

Марка сплава	Основные технические характеристики	Назначение
52К10Ф 52К11Ф	Сплавы с магнитной энергией 16—24 кДж/м ³ . В зависимости от содержания ванадия $H_c = 4,8 \div 32$ кА/м, $B_r = 1,2 \div 0,65$ Тл. Магнитные свойства приобретаются после холодной деформации 70—90% и последующего отпуска	Малогабаритные магниты, активная часть гистерезисных двигателей
35КХ4Ф, 35КХ6Ф, 35КХ8Ф, 25КФ14Н, 35КФ10Н	Сплавы с заданными параметрами частной петли гистерезиса. Приобретают свойства после холодной деформации и отпуска. Сплавы 35КХ4Ф, 35КХ6Ф, 35КХ8Ф — анизотропны. Сплавы 25КФ14Н, 35КФ10Н имеют прямоугольную петлю гистерезиса	Активная часть гистерезисных двигателей

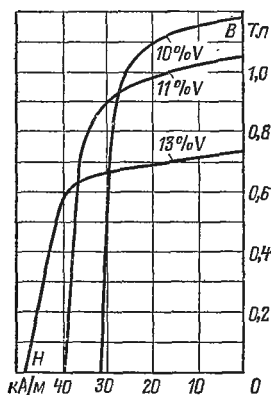


Рис. 11-38. Кривые размагничивания сплава 52КФ в зависимости от процентного содержания ванадия.

приблизительно стехиометрического состава при $(BH)_{max} = 75 \div 90$ кДж/м³.

Для изготовления малогабаритных магнитов и активной части гистерезисных двигателей распространение получили железokoбальтванадиевые сплавы с заданным сочетанием параметров предельной петли гистерезиса. Сплавы изготавливают в виде проволоки и лент. Магнитные свойства в направлении холодной деформации регламентируются ГОСТ 10994-74 (табл. 11-31) [11-10]. Увеличение процентного содержания ванадия приводит к уменьшению B_r , но одновремен-

ному увеличению H_c и $(BH)_{max}$ (рис. 11-38).

Низкие гистерезисные свойства и высокая стоимость железokoбальтванадиевых сплавов в ковном состоянии делают нецелесообразным их применение в электрома-

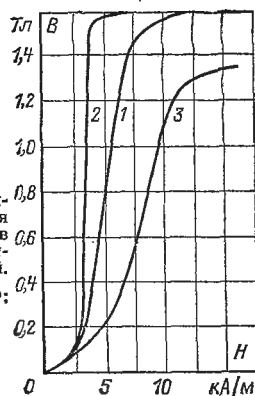


Рис. 11-39. Основные кривые намагничивания магнитных материалов для активной части гистерезисных двигателей.

1 — 35КХ4Ф; 2 — 35КХ8Ф; 3 — 35КФ10Н.

шиностроении. Для двигателей с рабочими полями 2—10 кА/м нашли применение сплавы систем Fe-Co-Cr-V и Fe-Co-Ni-V. Технические характеристики прецизионных магнитно-твердых сплавов регламентируются ГОСТ 10994-74 (табл. 11-31) [11-10]. На рис. 11-39 представлены основные кривые

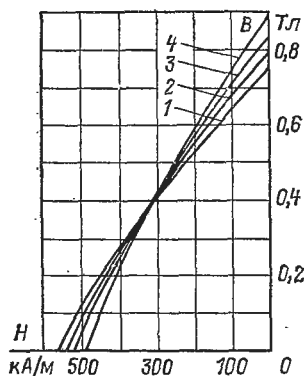


Рис. 11-40. Кривые размагничивания магнитно-твердых сплавов.

1 — КС37; 2 — КС37А; 3 — КСП37; 4 — КСП37А.

намагничивания сплавов 35КХ4Ф, 35КХ8Д, 35КФ10Н.

В последние годы успешное развитие получили высококоэрцитивные материалы на основе соединений редкоземельных металлов и кобальта. Получают их по специальной технологии с применением сильных магнитных полей для текстурирования и

Таблица 11-32

Основные параметры магнитно-твердых спеченных материалов, ГОСТ 21559-76

Марка материала	B_r , Тл	H_{CB} , кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м ³	H_{CM} , кА/м
КС37	0,77	540	110	1330
КС37А	0,82	560	130	1000
КСП37	0,85	520	130	800
КСП37А	0,90	500	145	640

высоких давлений для прессования порошков. Параметры спеченных магнитно-твердых материалов на основе сплавов редкоземельных элементов с кобальтом приведены в табл. 11-32 и соответствуют ГОСТ 21559-76 [11-15].

Кривые размагничивания сплавов КС37, КС37А, КСП37 и КСП37А показаны на рис. 11-40.

11-8. ЦЕНЫ

В табл. 11-33 — 11-34 представлены цены на наиболее широко распространенные магнитные материалы.

Таблица 11-33

Основные цены на электротехническую сталь и пермаллон

Наименование и марка сплава	Толщина, мм	Вид поставки	Цена за тонну, руб.
1211—1213	0,5—1,00	Лист 500×1500—1000×2000	224—157
1311—1313	0,5	Лист 500×1500—1000×2000	269—213
1411—1413	0,35—0,5	Лист 500×1500—1000×2000	314—235
1511—1514	0,35—0,5	Лист 500×1500—1000×2000	339—260
1521	0,1—0,35	Лист 500×1500—1000×2000	690—331
1561—1572	0,2—0,35	Лист 500×1500—1000×2000	542—332
2011—2013	0,5—0,65	Рулон 500—1000	314—194
2111—2112	0,5—0,65	Рулон 500—1000	306—174
2211—2212	0,5—0,65	Рулон 500—1000	334—249
2311—2312	0,5—0,65	Рулон 500—1000	360—268
2411—2412	0,5—0,65	Рулон 500—1000	519—339
3411—3413	0,35—0,5	Рулон 750—1000	638—326
3414—3415	0,28—0,35	Рулон 750—1000	750—459
3416	0,28	Рулон 750—1000	782—699
3421	0,2	Рулон 750—1000	665
10 864—10 895	5—250	Лист 500×1500—1000—2000	335—170
11 864—11 895			

Продолжение табл. 11-3

Наименование и марка сплава	Толщина, мм	Вид поставки	Цена за тонну, руб.
45Н	—	Слитки	2000
50Н, 50НП	—	»	2220
65Н, 65НП	—	»	3040
34НKM, 34НKMП	—	»	11 320
50НХС	—	»	2420
79НМ	—	»	3840
80НМ	—	»	4940
80НХ	—	»	3520
77НМД	—	»	4680
76НХД	—	»	3650
37НКДП	—	»	8960

Таблица 11-34

Оптовые цены на магнитно-твердые сплавы

Марка сплава	Цена за 1 т, руб.
ЮНДК-24	6600
ЮНДК-25	25 000
ЮНДК-35Т5ВА	19 100
ЮНДК-35БА	46 000
52КФ11	15 680
ПЛК-76, ПЛК-78	5·10 ³
КС-37	1,5·10 ³

Список литературы

11-1. Рейнбот Г. Магнитные материалы и их применение. — Л.: Энергия, 1970. — 384 с.

11-2. Хек К. Магнитные материалы и их техническое применение. — М.: Энергия, 1973. — 304 с.

11-3. ГОСТ 3836-73. Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты.

11-4. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. — М.: Энергия, 1974. — 240 с.

11-5. ГОСТ 21427.0-75 — ГОСТ 21427.3-75. Сталь электротехническая тонколистовая.

11-6. ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электротехническая нелегированная.

11-7. ГОСТ 21427.4-78. Лента стальная электротехническая холоднокатаная анизотропная.

11-8. ГОСТ 10160-75. Сплавы прецизионные магнитно-мягкие.

11-9. Ферриты и магнитодиэлектрики. Справочник/Под ред. Н. Д. Горбунова, Г. А. Матвеева. — М.: Советское радио, 1968. — 176 с.

11-10. ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные.

11-11. Прецизионные сплавы. Справочник/Под ред. В. В. Молотилова. — М.: Металлургия, 1974. — 448 с.

11-12. ГОСТ 6862-71. Прутки из легированной магнитотвердой стали.

11-13. ГОСТ 17809-72. Материалы магнитотвердые литые.

11-14. ГОСТ 13596-68. Магниты металлокерамические постоянные.

11-15. ГОСТ 21559-76. Материалы магнитно-твердые спеченные.

- 11-16. Постоянные магниты. Справочник/Под ред. Ю. М. Пятина. — М.: Энергия, 1980. — 488 с.
- 11-17. Боровик Е. С., Мильнер А. С., Еременко В. В. Лекции по магнетизму. — Харьков: Изд-во ХГУ, 1972. — 248 с.
- 11-18. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы. — М.: Высшая школа, 1976. — 335 с.
- 11-19. Справочник по электротехническим материалам/Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Па-

- сынова, Б. М. Тареева. Т. 3.— Л.: Энергия, 1976 — 896 с.
- 11-20. Сергеев В. В., Булыгина Т. И. Магнитотвердые материалы. — М.: Энергия, 1980. — 224 с.
- 11-21. Технология обработки высококоррозийных сплавов/Л. В. Худобин и др. — М.: Энергия, 1979. — 184 с.
- 11-22. ГОСТ 16693-74. Материалы магнитные. Термины и определения.

Раздел 12

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА И ШИНЫ

СОДЕРЖАНИЕ

12-1. Общие сведения	351
12-2. Медь	352
12-3. Латуни	355
12-4. Проводниковые бронзы	359
12-5. Алюминий	363
12-6. Алюминиевые сплавы	365
12-7. Сплавы высокого сопротивления для электроизмерительных приборов	367
12-8. Жаростойкие сплавы высокого сопротивления	371
12-9. Сверхпроводниковые и криопроводниковые материалы	375

12-10. Контактные материалы и электро- щетки	377
12-11. Медная проволока	384
12-12. Проволока алюминиевая и из алю- миниевых сплавов	385
12-13. Неизолированные провода	387
12-14. Шины и ленты	391
12-15. Контактные провода	392
12-16. Профили для коллекторов электри- ческих машин	394
12-17. Цены	395
Список литературы	396

12-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Проводниковые материалы применяют-ся для изготовления токопроводящих эле-ментов электроустановок. Наибольшее рас-пространение получили такие твердые про-водниковые материалы, как металлы и их сплавы, а также электроугольные изделия.

Удельное электрическое сопротивление проводников ρ принято выражать в системе СИ в мкОм·м. Удельная проводимость $\gamma = 1/\rho$ в этом случае выражается в МСм/м. Так называемая стандартная медь, по отношению к удельной проводимости которой выражают в процентах проводимость дру-гих проводниковых материалов, имеет в отожженном состоянии $\gamma = 58$ МСм/м, чему соответствует $\rho = 0,017241$ мкОм·м. На практике для измерения удельного сопро-тивления проводниковых материалов часто применялась внесистемная единица Ом·X мм²/м, так как при расчете сопротивле-ния токопроводящего элемента его длину удобно выражать в метрах, а площадь по-перечного сечения — в квадратных милли-метрах, причем $1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} = 1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

Высокая проводимость металлических проводников обусловлена значительной концентрацией свободных электронов. Удельные сопротивления этих материалов

при нормальной температуре лежат в срав-нительно узком диапазоне (10^{-2} — 10 мкОм·м), и разница определяется глав-ным образом различным подвижностью элек-тронов проводимости.

Удельное сопротивление металлов свя-зано преимущественно с рассеянием свобод-ных электронов на тепловых колебаниях атомов и дефектах кристаллической решет-ки (примесные атомы, вакансии, дислока-ции и др.):

$$\rho = \rho_{\text{тепл}} + \rho_{\text{ост}}$$

При температурах, превышающих тем-пературу Дебая Θ (для металлов $\Theta = 100 \div 500$ К), удельное сопротивление обуслов-лено главным образом тепловыми колеба-ниями решетки (сопротивлением $\rho_{\text{тепл}}$) и возрастает практически линейно (рис. 12-1). При низких (криогенных) температурах ρ практически перестает зависеть от темпе-ратуры и определяется остаточным сопро-тивлением $\rho_{\text{ост}}$, являющимся количественной мерой концентрации дефектов кристалличе-ской решетки. В проводниковых металлах высокой проводимости, имеющих при нор-мальной температуре удельное сопротивле-ние не более $0,1$ мкОм·м, содержание при-месей ограничивается десятками, сотыми и даже тысячными долями процента с целью

снижения их удельного сопротивления за счет $\rho_{\text{ост}}$. Особо чистые металлы с малым значением $\rho_{\text{ост}}$ применяются в качестве криопроводниковых материалов, предназначенных для работы при температурах 70—100 К и ниже.

Для изготовления реостатов, резисторов, электронагревательных элементов применяются не металлы, а сплавы высокого сопротивления (их удельное сопротивление при нормальной температуре не менее

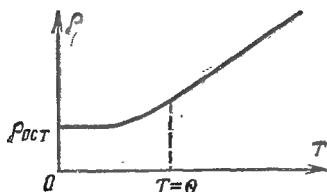


Рис. 12-1. Типичная зависимость удельного электрического сопротивления металла от температуры.

0,3 мкОм·м), обладающие повышенной величиной $\rho_{\text{ост}}$ вследствие нарушения правильности структуры решетки. Особенно заметно увеличение удельного сопротивления у сплавов, являющихся твердыми растворами.

У твердых (твердотянутых) металлов и сплавов, подвергнутых холодной протяжке, волочению, удельное сопротивление в результате искажения кристаллической решетки повышается. Мягкие (отожженные) металлы и сплавы вследствие рекристаллизации восстанавливают искаженную при пластической деформации структуру, и их удельное сопротивление уменьшается.

Изменение сопротивления проводника с температурой характеризуется температурным коэффициентом удельного сопротивления ТКР:

$$\text{ТКР} = \alpha_p = \frac{1}{\rho_T} \frac{d\rho}{dT},$$

имеющим размерность, обратную размерности температуры ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Коэффициент α_p характеризует свойства материала при фиксированной температуре T , которой соответствуют значения удельного сопротивления ρ_T и производной $d\rho/dT$. В таблицах часто приводится значение α_p при 20°C . Для расчетов удобно пользоваться средним температурным коэффициентом удельного сопротивления

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho_1 - \rho_0}{T_1 - T_0},$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при температуре T_0 , принятый за начальную, а ρ_1 — при температуре T_1 . Пользуясь коэффициентом $\alpha_{\text{ср}}$, определенным для интервала температур T_0 — T_1 , можно достаточно точно найти значение ρ_2 для любой температуры T_2 внутри этого интервала:

$$\rho_2 = \rho_0 [1 + \alpha_{\text{ср}} (T_2 - T_0)].$$

Поскольку зависимость $\rho(T)$ для проводников не является строго прямолинейной даже при температурах выше Θ , результат будет тем точнее, чем уже был взят интервал температур T_1 — T_0 при определении $\alpha_{\text{ср}}$.

Металлы имеют большой температурный коэффициент удельного сопротивления (у большинства $4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ и более), так что их сопротивление с температурой изменяется очень заметно. У сплавов значение α обычно значительно меньше (10^{-4} — $10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). Сплавы с $\alpha_p = 10^{-5}$ — $10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ можно считать материалами, практически не изменяющими сопротивления в широком диапазоне температур.

При соприкосновении двух металлических проводников на границе между ними возникает контактная разность потенциалов, которая обусловлена различием работы выхода электронов из разных металлов и неодинаковой концентрацией этих частиц. Если электрическая цепь из двух проводников имеет два спая, один из которых имеет температуру T_1 , а другой — температуру T_2 , то между спаями возникает термо-ЭДС

$$U = C (T_1 - T_2),$$

где C — характеризующая данную пару удельная термо-ЭДС, измеряемая в мкВ/К.

Для термопар применяют материалы, имеющие удельную термо-ЭДС. В электроизмерительной технике применяют проводниковые материалы с минимальной удельной термо-ЭДС в паре с медью, чтобы паразитные термо-ЭДС не искажали результатов измерений.

Среди тепловых характеристик проводниковых материалов основными являются удельная теплоемкость, удельная теплопроводность и температурный коэффициент линейного расширения.

Механические свойства оцениваются обычно пределом прочности при растяжении σ_p , относительным удлинением при разрыве $\Delta l/l_0$ и твердостью. σ_p проводников выражают в системе СИ в МПа, а прежде эту характеристику оценивали в кгс/мм², причем $1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,8 \text{ МПа}$. Относительное удлинение принято определять в процентах. Твердость металлов и сплавов оценивается числом Бринелля, приводимым без указания единицы.

Твердотянутые металлы и сплавы прочнее и тверже отожженных, но зато последние пластичнее (их удлинение при разрыве во много раз больше). Сплавы более прочны, тверды и упруги по сравнению с чистыми металлами.

12-2. МЕДЬ

Удачное сочетание технических ценных свойств позволяет считать медь важнейшим металлом высокой проводимости, так как у нее:

1) минимальное удельное сопротивление (только серебро имеет ρ примерно на 5% меньше, чем чистая медь);

2) достаточно высокая для большинства случаев практического применения механическая прочность;

3) удовлетворительная стойкость к воздействию окружающей атмосферы;

4) хорошая технологичность; благодаря сочетанию прочности и пластичности медь перерабатывается в листы, ленты, шины, профили для коллекторов электрических машин, проволоку и другие изделия;

5) относительная легкость пайки и сварки, что важно, в частности, при монтажных работах.

Существенным недостатком меди является дефицитность, обусловленная малой распространенностью ее в природе. В земной коре меди содержится лишь $4,7 \cdot 10^{-3}\%$ (мас.), причем в верхней части — только $2 \cdot 10^{-3}\%$. В связи с развитием промышленности, несмотря на рост производства меди, вопрос замены ее в подходящих случаях другими проводниковыми материалами, главным образом алюминием, не утратит своей актуальности и в будущем.

Общие физические свойства меди

Атомный номер	29
Атомная масса	63, 54
Изотопы	63 и 65
Валентность	1 и 2
Плотность стандартной меди при 20° С, кг/м³	8890

Электрические свойства меди

Удельное сопротивление чистой меди при 20° С, мкОм·м	0,0168
Удельная проводимость чистой меди при 20° С, МСм/м	59,5
Удельное сопротивление отожженной стандартной меди при 20° С, мкОм·м	0,017241
Удельная проводимость отожженной стандартной меди при 20° С, МСм/м	58
Температурный коэффициент удельного сопротивления (0—150° С), °С ⁻¹	0,0043
Отношение сопротивления расплавленной меди к сопротивлению твердой меди (при температуре плавления)	2,07
Работа выхода электронов, эВ	4,35
Термо-ЭДС в паре с платиной (0—100° С), мВ	0,76

Удельное сопротивление ρ является наименьшим у чистой меди. Примеси снижают удельную проводимость меди. Согласно ГОСТ 859-78 поставляемая промышленностью медь разделяется по химическому составу на различные марки. Так как примеси оказывают неблагоприятное влияние на электропроводность, в качестве проводниковой используется медь с суммарным содержанием примесей не более 0,1% (серебро засчитывается при этом в содержание меди). Эти марки меди, поставляемые в виде слитков и полуфабрикатов, и их химический состав приведены в табл. 12-1.

Медь марок М1 и М1р, предназначенная для электротехнических целей, дополнительно обозначается буквой Е.

Для марок меди, приведенных в табл. 12-1, ГОСТ 859-78 нормирует значения ρ

и γ : для полуфабрикатов из меди марок М06, М16 и М1, предназначенных для электротехнических целей, ρ отожженной проволоки при температуре 20° С не должно превышать 0,01724 мкОм·м (т. е. γ должна быть не менее 58 МСм/м); для полуфабрикатов из меди марок М1р и М1, предназначенных для отдельных видов продукции, в которых допускается повышенное сопротивление, ρ не должно превышать 0,01754 мкОм·м (γ должна быть не менее 57 МСм/м); для полуфабрикатов из меди марок М006 и М1у ρ не должно превышать 0,01706 мкОм·м (γ должна быть не менее 58,6 МСм/м).

После холодной обработки удельное сопротивление меди увеличивается на 1—3% и больше.

Примеси отрицательно влияют также на механические и технологические свойства меди. Вреднейшими примесями являются висмут и свинец. Эти элементы почти не растворимы в меди и образуют легкоплавкую эвтектику, расположенную вокруг зерен меди. Тысячные доли процента висмута и сотые доли процента свинца делают медь красноломкой: при обработке давлением при 850—1150° С металл растрескивается. Примесь серы делает медь хрупкой на холоде, что снижает ее пластичность. Поэтому в марках меди для электротехнической промышленности содержание серы особо ограничивается: в марке М1у — не более 0,003%, в марке М06 для эмалированных — не более 0,002%. Нежелательной примесью является кислород. Наименьшее его количество содержится в марках бескислородной меди (0,001—0,003%). Медь марки М1 изготовляется в соответствии с ГОСТ 193-67 в слитках горизонтальной отливки типов СН-I и СН-II с неудаленным верхним поверхностным слоем и типов СС-I и СС-II с удаленным (сосроганным) верхним поверхностным слоем. В слитках с удаленным поверхностным слоем содержание кислорода должно быть не более 0,045%, а с неудаленным — не более 0,06%. На границе зерен меди в слитках образуется пленка эвтектики Cu—Cu₂O, снижающая пластичность и затрудняющая переработку меди холодной протяжкой и волочением. Водород и другие горючие газы (метан, окись углерода), действуя при высокой температуре на заготовку, содержащую Cu₂O, восстанавливают закис меди до металла с образованием водяного пара и углекислого газа, которые не растворяются в меди и выделяются из нее, вызывая растрескивание и резкое ухудшение механических свойств (водородная болезнь). Таким образом, бескислородная медь обладает не только особо высокой удельной проводимостью, пластичностью (тягучестью) и стойкостью к кратковременным воздействиям повышенных температур, но и может отжигаться в среде водорода.

В обычных атмосферных условиях медь довольно устойчива против коррозии, ибо химическая активность ее невелика. При

Таблица 12-1

Марки и химический состав проводниковой меди (ГОСТ 859-78)

Обозначения марок	Cu+Ag, %, не менее	Примеси, %, не более											Характеристика способа изготовления меди
		Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O	Zn	P	
M006	99,99	0,0005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,0005	} Бескислородная
M06	99,97	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,003	0,002	
M16	99,95	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004	0,003	0,003	0,002	
M1y	99,9	0,0005	0,002	0,001	0,005	0,002	0,004	0,001	0,004	—	0,004	—	} Катодная переплавленная
M1	99,9	0,001	0,002	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,004	—	0,004	—	
M1p	99,9	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,01	0,005	0,002—0,012	} Раскисленная

Примечание. Содержание серебра в меди марок M06, M1y и M1 не должно превышать 0,003% (мас.). По требованию потребителя медь этих марок изготавливают с содержанием серебра не более 0,0025% (мас.).

В марках меди, предназначенных для электротехнических целей, определяют только содержание меди и электрическое сопротивление.

Содержание кислорода в меди марок M1 и M1y соответствует ГОСТ 193-67 и ГОСТ 5.1073-74.

Для электротехнической промышленности в меди марки M1y массовая доля серы не должна превышать 0,003%, а в меди марки M06 для эмалированных проводов 0,002%.

20°С в сухом воздухе медь не окисляется, практически не окисляется во влажном воздухе и в пресной воде, однако в соленой воде медленно корродирует. В присутствии влаги и углекислого газа на поверхности меди образуется зеленая пленка основного карбоната. При нагревании на воздухе идет поверхностное окисление с образованием защитной пленки окиси меди Cu_2O , весьма медленное при температурах до 200°С; интенсивное окисление меди начинается при температурах выше 225°С. С холодными и теплыми серной и соляной кислотами при концентрации ниже 80% медь практически не реагирует. Растворимость водорода в твердой меди незначительна и при 400°С составляет 0,06 мг в 100 г. Медь растворяется в азотной кислоте, легко соединяется с хлором и другими галогенами, горит в парах серы.

Механические свойства проводниковой меди резко зависят от ее состояния. Отожженная, мягкая медь (марки ММ) менее прочна, но более пластична, чем твердотянутая (марки МТ), подвергнутая деформации в холодном состоянии. Число Бригелля мягкой меди при 20°С 35, нагартованной меди 65—120. Механические свойства проводниковой меди в зависимости от температуры приведены в табл. 12-2. При нагреве выше 200°С прочность твердой меди резко снижается — происходит рекристаллизация, и металл отжигается. Небольшие легирующие добавки (десятые доли процента) заметно увеличивают температуру рекристаллизации меди, повышая ее термическую устойчивость. Представляют интерес для электротехники низколегированные сплавы меди с присадкой серебра, циркония, хрома, магния, ниобия, бериллия, титана и др., соче-

Таблица 12-2

Механические свойства проводниковой меди в зависимости от температуры

Параметры	Температура, °С									
	20	100	200	250	300	20	100	200	250	300
	Твердотянутая медь					Отожженная медь (650°С, 1/2 ч)				
Предел прочности при растяжении, МПа	409	372	318	207	146	239	208	175	164	144
Относительное удлинение, %	5,4	5,5	6,6	27,3	54,2	47,2	46,4	42,6	38,6	40
Сужение площади поперечного сечения, %	56,1	53,8	59,3	73	61,3	71,4	72,1	61,3	60,6	51,6
Модуль упругости статический, ГПа	121,5	108,6	103,75	99,2	98	117	117,8	110,8	102	102
Модуль упругости динамический, ГПа	112	91	89	—	76	73,5	69	64	—	—
Напряжение при остаточном удлинении 0,2% (предел текучести), МПа	396	353	295	155	47	57,5	49,5	42	40	39
Предел вибрационной усталости, МПа	95	76	59	—	35	74	66	52	—	—

тающие высокую проводимость с повышенной жаропрочностью. Практическое применение для изготовления коллекторной заготовки, а также прутков для короткозамкнутых высокоскоростных асинхронных электродвигателей получила медь, легированная серебром (0,03—0,12%) в соответствии с ТУ 48-21-197-72, ТУ 48-08-443-71, ТУ 48-08-447-71.

Тепловые и технологические свойства меди

Удельная теплопроводность при 20° С, Вт/(м·°С)	394,3
Удельная теплоемкость при 20° С, Дж/(кг·°С)	385,5
Температура плавления, °С	1083±0,1
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100° С), °С ⁻¹	16,4·10 ⁻⁶
Температура кипения, °С	2300—2590
Температура начала рекристаллизации для бескислородной меди, °С	150
Температура рекристаллизации, °С	200—300
Температура отжига, °С	500—700
Температура горячей обработки, °С	900—1050
Температура литья, °С	1150—1200
Объемная усадка, %	4,1
Длительная температура эксплуатации в обмоточных про- водах на воздухе, °С	220

12-3. ЛАТУНИ

Латуни — двойные или многокомпонентные сплавы на основе меди, в которых главной легирующей добавкой является цинк. Двойные медноцинковые сплавы называются простыми латунями, а многокомпонентные — специальными. Латуни дешевле меди, но прочнее и тверже ее, хорошо обрабатываются в холодном и горячем состоянии.

Структура и свойства латуней в первую очередь определяются содержанием цинка. Практическое применение имеют сплавы с содержанием цинка до 45%. При температурах до 453° С цинк растворяется в твердом состоянии в меди до 39%. Такие растворы на основе кубической гранцентрированной решетки меди однофазны и называются α-латунями. При содержании 39—46% цинка сплавы двухфазны. Они являются композицией зерен α- и β-фаз и называются α+β-латунями (β-латунь — твердый раствор на основе соединения CuZn с объемно-центрированной решеткой).

С увеличением содержания цинка до 45% предел прочности при растяжении у латуней непрерывно возрастает. Относительное удлинение при разрыве растет по мере увеличения содержания цинка до 32%, а затем снижается, причем особенно резко в сплавах, содержащих более 39% цинка. Поэтому α-латуни более пластичны в холодном состоянии, чем α+β-сплавы, и хорошо обрабатываются давлением. Наиболее пластична латунь марки Л68 (32% цинка),

позволяющая изготавливать токоведущие детали сложной формы холодной штамповкой и глубокой вытяжкой. Пластичность же α-латуней в интервале 300—700° С резко снижается, так что их горячая обработка затруднена. Напротив, α+β-сплавы повышают пластичность при температурах выше 500° С и поэтому хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии.

Латуни разделяются на обрабатываемые давлением (ГОСТ 15527-70) и литейные (ГОСТ 17711-72). Марки латуней начинаются с буквы Л. В марке простой латуни цифра указывает среднее содержание меди в процентах (остальное — цинк). Простые латуни, содержащие до 10% цинка, называются томпаками (Л196, Л190), а выше 10 до 20% — полутомпаками (Л185, Л180). Они отличаются хорошей пластичностью, повышенной по сравнению с другими латунями электро- и теплопроводностью. Обработка томпаков резанием затрудняется их вязкостью.

Легирующие элементы, вводимые в медные сплавы для улучшения свойств, обозначаются в марках следующими буквами: А — алюминий, Б — бериллий, Ж — железо, К — кремний, Мг — магний, Мн — марганец, Миш — мышьяк, Н — никель, О — олово, С — свинец, Кд — кадмий, Т — титан, Ф — фосфор, Цр — цирконий. В марке многокомпонентной латуни первая цифра указывает среднее содержание меди, а последующие — легирующих элементов в процентах (например, ЛАН59-3-2 содержит 59% меди, 3% алюминия, 2% никеля, остальное — цинк). Буква Л в конце марки латуни означает, что сплав предназначен для фасонного литья (ЛК80-3Л).

Для повышения механической прочности и коррозионной стойкости в латуни вводят алюминий, олово, марганец, железо, никель, кремний. Олово и мышьяк повышают стойкость к действию морской воды. Свинец повышает антифрикционные свойства латуни и облегчает обработку резанием, делая стружку ломкой, но снижает пластичность сплава. При добавке в литейные сплавы свинец улучшает их технологические свойства. Добавка марганца повышает ductility сплава. Железо в количестве, большем 0,03%, придает латуням магнитные свойства. В так называемых антимагнитных латунях содержание железа поэтому ограничивают 0,03% и даже 0,01%. Теллур и селен даже в малых количествах образуют с медью хрупкие соединения, что приводит к появлению трещин при обработке сплава давлением. Алюминий может ухудшить технологические свойства сплавов вследствие невозможности применения для их пайки мягких припоев, например латуней марок ЛА77-2 и ЛА67-2,5.

Латуни стойки к атмосферной коррозии, однако многие сплавы, содержащие более 20—30% цинка, склонны к растрескиванию из-за одновременного действия остаточных напряжений в изделии и коррозионного воздействия аммиака, а также сернистого газа во влажной атмосфере. Это явление назы-

Физико-механические и технологические свойства

Марка латуни	Плотность, кг·м ⁻³	ρ при 20° С, мкОм·м	ТК ρ , °С ⁻¹	σ_p , МПа		Относительное удлинение, %		Число Бринелля	Удельная ударная вязкость, МДж·м ⁻²	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)
				мягкой латуни	твердой латуни	мягкой латуни	твердой латуни			
Л96	8850	0,043	0,0027	230—260	510	45—50	4	50/120*	—	245
Л68	8500—8600	0,068	0,0010	300—350	650—830	40—60	3—3,5	52	1,7—2,0	109
Л63	8500	0,071	0,0017	300—330	600	50	0,5	56	1,4	83,5
ЛЖМц59-1-1	8500	0,090	0,0018	380—450	500—520	24—50	10	80—90	—	101
ЛМц58-2	8500	0,103	0,0013	350—450	500—600	30—44	3—10	80—90/140*	—	92
ЛС59-1	8500	0,065	0,0017	340—400	450—650	20—30	5—8	75	0,46—0,48	105
ЛК80-3	7900—8300	0,254—0,326	4,75·10 ⁻⁴	250—300	650—900	20—25	2—10	100—120* 220—237	—	—

* Данные в числителе относятся к мягкому, а в знаменателе — к твердому состоянию сплава.

вают сезонной болезнью латуни, так как наблюдается оно в месяцы с повышенной влажностью. Растрескивание предотвращают, проводя отжиг при 250—350°С для снятия остаточных напряжений.

После холодной деформации прочность и твердость латуней возрастают, пластичность резко снижается. Отжиг обычно в интервале 600—800°С состояния наклепа снимает, сплав становится пластичным, его прочность и твердость уменьшаются.

Физико-механические и технологические свойства некоторых распространенных в электротехнике марок латуней, предусмотренных ГОСТ 15527-70, приведены в табл.

12-3. Перечисленные в этой таблице латуни (кроме Л96) свариваются газовой и электрической сваркой, а томпак Л96 — только газовой сваркой; кроме латуни марки ЛК80-3, которая паяется только твердыми припоями, упомянутые в табл. 12-3, остальные латуни могут паяться как мягкими, так и твердыми припоями. Механические свойства и плотность некоторых марок литейных медно-цинковых сплавов (ГОСТ 17711-72) характеризуются данными, приведенными в табл. 12-4.

Простые латуни благодаря высокой пластичности легко перерабатываются в листы, полосы, прутки, ленты, проволоку,

Таблица 12-5

Механические свойства латунной проволоки (ГОСТ 1066-75)

Марка сплава	Размер проволоки, мм	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее			Относительное удлинение, %		
		мягкой	полутвердой	твердой	мягкой	полутвердой	твердой
Л30	0,20—5,0	300	350	—	25	15	—
Л68	0,10—0,18	380	—	700—950	20	—	—
	0,20—0,75	350	400	700—950	25	5	—
	0,80—1,40	320	380	600—800	30	10	—
	1,50—12,0	300	350	550—750	40	15	—
Л63	0,10—0,18	350	—	750—950	18	—	—
	0,20—0,50	350	450	700—950	20	5	—
	0,55—1,0	350	450	700—900	25	5	—
	1,10—4,8	350	400	600—800	30	10	—
	5,9—12,0	320	360	550—750	34	12	—
ЛС59-1	2,0—4,8	350	400	500—650	30	10	5
	5,0—12,0	350	400	450—650	30	12	8

Примечание. Размер проволоки: для круглой — диаметр, для квадратной и шестигранной — диаметр вписанной окружности. Квадратная и шестигранная проволоки изготавливаются размером от 3,0 до 12,0 мм из латуни марок Л68, Л63 и ЛС59-1.

Таблица 12-3

Механические свойства латуней

Температурный коэффициент линейного расширения, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Температура плавления, $^\circ\text{C}$	Температура литья, $^\circ\text{C}$	Температура отжига, $^\circ\text{C}$
17	1070	1160—1200	650—850
18,5	938	1100	600—700
20	905	1020—1050	600—700
20,3	890	1000—1060	600—700
21,2	880	1000—1050	600—700
18,5	890	1020—1060	750—800
18,8—20,8	836—916	960—1080	680—700

Таблица 12-4

Механические свойства и плотность некоторых литейных латуней

Марка латуни	Способ литья	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Число Бринелля	Плотность, кг-м ⁻³
		не менее			
ЛК80-3Л	Литье в кокиль	300	15	110	8300
	Литье в землю	300	15	100	8300
ЛА67-2,5	Литье в кокиль	400	15	90	8500
	Литье в землю	300	12	80	8500
ЛС59-1Л	Центробежное литье	200	20	30	8500

штамуются и вытягиваются, легко выдерживают резкие изгибы, свариваются и паяются. Они широко применяются для изгото-

товления различных токопроводящих деталей электрооборудования, причем особенно часто — латуни Л68 и Л63. Латуни марок

Таблица 12-6

Механические свойства латунных прутков (ГОСТ 2060-73)

Марка латуни	Способ изготовления и состояние материала	Размер, мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
			не менее	
Л63	Прессованные	10—160	300	30
	Тянутые:			
	мягкие	3—50	300	40
	полутвердые	3—40	380	15
	твердые	3—12	450	10
ЛС59-1	Прессованные	10—160	370	18
	Тянутые:			
	мягкие	3—50	340	22
	полутвердые	3—40	400	15
	твердые	3—12	500	5
ЛС63-3	Тянутые:			
	твердые	3—9,5	600	1
		10—14	550	1
		15—20	500	1
	полутвердые	10—20	360	12
ЛО62-1	Прессованные	10—160	370	20
	Тянутые полутвердые	3—50	400	15
ЛЖС58-1-1	Прессованные	10—160	300	20
	Тянутые полутвердые	3—50	450	10

Продолжение табл. 12-6

Марка латуни	Способ изготовления и состояние материала	Размер, мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
			не менее	
ЛМц58-1	Прессованные	10—160	400	25
	Тянутые полутвердые	3—12	450	20
		12—50	420	20
ЛЖМц59-1-1	Прессованные	10—150	440	28
	Тянутые полутвердые	3—12	500	15
		12—50	450	17
ЛАЖ60-1-1	Прессованные	10—160	450	18

Примечание. Из латуни марки ЛС63-3 изготавливаются прутки круглого профиля, из остальных марок — круглого, квадратного и шестигранного. Размер прутков: для круглых — диаметр, для квадратных и шестигранных — диаметр вписанной окружности.

Таблица 12-7

Механические свойства латунных труб общего назначения (ГОСТ 494-76)

Способ изготовления и состояние материала	Марка латуни	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
		не менее	
Трубы тянутые и холоднокатанные мягкие	Л63	300	40
	Л68	300	40

Продолжение табл. 12-7

Способ изготовления и состояние материала	Марка латуни	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
		не менее	
Трубы тянутые и холоднокатанные полутвердые	Л63	380	25
	Л68	350	35
Трубы прессованные	Л60	350	20
	Л63	280	38
	ЛС59-1	400	20
	ЛЖМц59-1-1	440	28

Примечание. Трубы тянутые и холоднокатанные изготавливаются с наружным диаметром от 3 до 100 мм, толщиной от 0,5 до 10 мм, трубы прессованные — диаметром от 21 до 195 мм и толщиной от 1,5 до 42,5 мм.

Таблица 12-8

Механические свойства латунных лент общего назначения (ГОСТ 2208-75)

Марка латуни	Состояние материала	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
Л90	Мягкий Полутвердый Твердый	240—350	35
		300—430	10
		≥360	3
Л85	Мягкий Полутвердый Твердый	260—370	38
		330—440	12
		≥400	3
Л80	Мягкий Полутвердый Твердый	270—380	40
		340—440	15
		≥400	3
Л68	Мягкий Полутвердый Твердый Особотвердый	300—380	42
		350—480	20
		440—550	10
		≥530	1
Л63	Мягкий Четвертьтвердый Полутвердый Твердый Особотвердый	300—420	38
		350—480	20
		420—550	10
		500—630	4
ЛС59-1	Мягкий Твердый Особотвердый	350—500	25
		470—650	5
		≥600	3
ЛМц58-2	Мягкий Полутвердый Твердый	390—500	30
		430—600	15
		≥580	4

Примечание. Толщина лент от 0,05 мм, ширина — от 10 до 600 мм.

Таблица 12-9

Механические свойства латунных листов и полос ГОСТ (931-78)

Метод изготовления	Марки латуни	Состояние материала	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
			не менее	
Холоднокатанные	Л90	Мягкий Полутвердый Твердый	240	35
			300	10
			360	3
	Л85	Мягкий Полутвердый Твердый	260	38
			330	12
			400	3
	Л80	Мягкий Полутвердый Твердый	270	40
			340	15
			400	3
	Л68	Мягкий Полутвердый Твердый Особотвердый	300	42
			360	20
			440	10
Горячекатанные	Л63	Мягкий Четвертьтвердый Полутвердый Твердый Особотвердый	300	38
			350	20
			420	10
	ЛС59-1	Мягкий Твердый	350	25
			470	5
	ЛМц58-2	Мягкий Полутвердый Твердый	390	30
			430	15
			600	3
	ЛО62-1	Твердый	400	5
	Л63 ЛО62-1 ЛС59-1 ЛМц58-2	— — — —	300	30
			350	20
			370	18
			400	25

Примечание. Толщина горячекатаных листов от 5 до 25 мм, холоднокатанных — от 0,4 до 12 мм. Размер листов от 600×1500 до 1000××2000 мм². Толщина холоднокатанных полос от 0,4 до 10 мм, ширина — от 40 до 500 мм.

ЛМц58-2, ЛЖМц59-1-1 и ЛС59-1 перерабатываются в листы, полосы, ленты, прутки и проволоку, хорошо обрабатываются резанием и полируются, паяются и свариваются. Они применяются для изготовления стержней короткозамкнутых роторов асинхронных электродвигателей, деталей соединителей, пружинящих контактов и других токоведущих частей, от которых требуются повышенные твердость и стойкость к действию электрических разрядов, свойственные латуням с добавкой марганца.

Латуни марок ЛК80-3Л и ЛС59-1Л применяются для изготовления литых токоведущих деталей электрических машин и аппаратов, а также для заливки короткозамкнутых роторов асинхронных электродвигателей. Латуни ЛК80-3Л и ЛА67-2,5 применяются для отливки токоведущих деталей, обладающих повышенной механической прочностью и твердостью, но паяющихся только твердыми припоями. Механические свойства и плотность упомянутых марок литейных латуней приведены в табл. 12-4, механические свойства полуфабрикатов, изготовленных из латуней, обрабатываемых давлением, — в табл. 12-5—12-9.

12-4. ПРОВОДНИКОВЫЕ БРОНЗЫ

Бронзами называются сплавы меди с различными химическими элементами, кроме цинка и никеля. Бронзы по сравнению с медью отличаются высокой механической прочностью, твердостью, упругостью как при нормальной, так и при повышенной температуре, стойкостью к истиранию.

Марки бронз начинаются буквами Бр, затем идут буквы, соответствующие наименованию легирующих элементов (см. § 12-3), и цифры, указывающие их среднее содержание в сплаве в процентах. Например, бронза БрОЦС4-4-2,5 содержит 4% олова, 4% цинка, 2,5% свинца, остальное — медь.

Наибольший интерес для электротехники представляют бронзы, сочетающие высокую проводимость с прочностью и твердостью (кадмиевая и хромовая бронзы), а также особо прочные сплавы с достаточно хорошей проводимостью (бериллиевые бронзы). Проводниковые бронзы применяются для изготовления контактных проводов для электрического транспорта, коллекторных пластин, контактных ножей, скользящих контактов, токоведущих пружин, упругих контактных элементов и пр.

Упрочнение некоторых бронз (например, хромовой и бериллиевой) достигается специальной термической обработкой в результате процесса дисперсионного твердения. Для создания термически упрочняемых сплавов применяют такие легирующие элементы, которые образуют с медью или между собой соединения, растворимость которых в твердом растворе на основе меди уменьшается с понижением температуры. При быстром охлаждении (закалке) таких сплавов образуется пересыщенный твердый

раствор, из которого при высокотемпературном старении (облагораживающем отжиге) выделяются тонкодисперсные интерметаллические соединения, упрочняющие сплав. Вследствие выделения этой фазы из твердого раствора электропроводность сплава повышается. Сравнительные свойства некоторых проводниковых бронз приведены в табл. 12-10.

Бронзы разделяются на бронзы оловянные, обрабатываемые давлением (ГОСТ 5017-74), бронзы оловянные литейные (ГОСТ 613-65), бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением (ГОСТ 18175-78), а также бронзы безоловянные литейные (ГОСТ 493-54).

Оловянные бронзы содержат от 3 до 8% олова. Упрочняющее влияние олова на механические свойства меди аналогично влиянию цинка, но выражено более резко. Пластичность сплава повышается с увеличением содержания олова до 5—6%, а затем начинает падать, особенно резко в сплавах, содержащих более 7—8% присадки. Для изготовления полуфабрикатов широкое применение нашли оловянно-фосфористые бронзы БрОФ6,5-0,15 и БрОФ7-0,2. Фосфор вводится как раскислитель и устраняет хрупкие включения окиси олова SnO, а также повышает антифрикционные свойства сплава.

Физические и технологические свойства бронзы БрОФ6,5-0,15

Плотность, кг/м ³	8800
Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	105
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100° С), °С ⁻¹	17·10 ⁻⁶
Удельное сопротивление (20° С), мкОм·м	0,13
Температурный коэффициент удельного сопротивления (20—100° С), °С ⁻¹	0,00073
Температура плавления, °С	1050
Температура отжига, °С	720

Применяются также оловянно-цинковые бронзы, содержащие до 5% цинка, удешевляющего сплав. Цинк в таких количествах растворяется в меди и не влияет существенно на структуру. Оловянные бронзы обрабатываются резанием, полируются, свариваются газовой и электрической сваркой, паяются мягкими и твердыми припоями, но отличаются повышенным удельным сопротивлением.

Физические и технологические свойства бронзы БрОЦ4-3

Плотность, кг/м ³	8900
Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	92
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100° С), °С ⁻¹	18·10 ⁻⁶
Удельное сопротивление (20° С), мкОм·м	0,095
Температура плавления, °С	1045
Температура отжига, °С	600—700

Таблица 12-10

Сравнительные свойства некоторых проводниковых бронз

Тип бронзы	Состояние	Удельная проводимость по отношению к стандартной меди, %	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
Кадмиевая (1% Cd)	Твердотянутая	83—90	>500	3—4
Циркониевая (0,5% Zr)	Твердотянутая	85—90	>500	3—4
Хромовая (0,5% Cr)	Остаренная после закалки	86	500—530	10—12
Оловянно-фосфористая (7% Sn, 0,1% P)	Отожженная	10—15	400	60
Бериллиевая (2,25% Be)	Твердотянутая	10—15	1050	3
	Остаренная после закалки	24	1100	8
	Твердотянутая после старения	—	>1350	1,5

Кадмиевая бронза БрКд1, содержащая около 1% кадмия, обладает в твердом состоянии сравнительно малым удельным сопротивлением — не более 0,0205 мкОм·м, высокими прочностью (см. табл. 12-10), твердостью (число Бринелля 95—115), стойкостью к истиранию и поэтому применяется для изготовления контактных проводов, коллекторных пластин, контактов силовых электрических аппаратов и пр. Конкурентами кадмиевой бронзы являются циркониевая БрЦр0,5, магниезо-циркониевая БрМгЦр0,15-0,15 и магниевая БрМг0,25 бронзы, обладающие в твердом состоянии удельным сопротивлением не больше (соответственно) 0,0200; 0,0215 и 0,0220 мкОм·м и имеющие предел прочности при растяжении до 500 МПа при относительном удлинении 3—4%. Эти бронзы применяются для изготовления контактных проводов. Циркониевая бронза применяется также для изготовления коллекторных пластин (число Бринелля — не менее 115 согласно ТУ 48-21-222-72). Ленты из циркониевой бронзы марки БрЦр 0,2, поставляемые в соответствии с ТУ 48-21-30-72 толщиной 0,4—1,0 мм в твердом состоянии, должны иметь удельное сопротивление не более 0,0188 мкОм·м. Ленты из магниевой бронзы марки БрМг 0,8, поставляемые согласно ТУ 48-21-123-72 толщиной от 0,1 до 0,5 мм в твердом состоянии, должны иметь предел прочности при растяжении не менее 600 МПа при удельном сопротивлении не больше 0,037 мкОм·м. Из магниевой бронзы, содержащей от 0,1 до 0,35% магния, в соответствии с ЦМТУ 08-38-67 изготавливаются коллекторные полосы с числом Бринелля не менее 90.

Хромовая бронза БрХ0,5 сочетает после закалки (900—1000°С) и обогащающего отжига при 400°С высокую проводимость с хорошей механической прочностью (см табл. 12-10). Хромовая бронза сохраняет твердость при нормальной температуре после нагрева до 400°С, предел усталости при переменной нагрузке примерно вдвое, а предел ползучести втрое выше, чем у меди. У этой бронзы число Бринелля — до 150—180. Из хромовой бронзы в соответствии с ЦМТУ 08-203-69

изготавливаются полосы толщиной от 3 до 8 мм, по ЦМТУ 08-144-69 — полосы толщиной от 1 до 8 мм с удельным сопротивлением не более 0,030 мкОм·м, а согласно ТУ 24-21-154-72 — полосы коллекторные. В соответствии с ТУ 48-08-395-71 поставляются профили из хромовой бронзы для контактов электрических аппаратов.

Физические свойства бронзы БрХ0,5

Плотность, кг·м ⁻³	8900
Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	334
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100°С), °С ⁻¹	15,8·10 ⁻⁶
Удельное сопротивление (20°С) после закалки и отжига, мкОм·м	0,020
Температурный коэффициент удельного сопротивления (20—100°С), °С ⁻¹	0,0035
Температура плавления, °С	1076

Бериллиевые бронзы также упрочняются дисперсионным твердением. Распространение получили сплавы, содержащие около 2% бериллия. Температура их закалки 800°С, температура обогащающего отжига 320°С. После термобработки эти бронзы весьма прочны и тверды (твердость по Бринеллю 350—370), имеют высокие пределы упругости, текучести и усталости, отличаются высокой электро- и теплопроводностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, холодостойкостью. Сплавы немагнитны, не дают искры при ударах. Бериллиевые бронзы дополнительно упрочняются после холодной деформации. Бериллиевые бронзы широко применяются для изготовления упругих токоведущих элементов и деталей скользящих и разрывных контактов. Однако эти сплавы дороги, а их производство затруднено токсичностью бериллия.

Физические свойства бронзы БрБ2

Плотность, кг/м ³	8230
Удельная теплопроводность облагороженной бронзы, Вт/(м·°С)	104,5
Удельное сопротивление (20°С), мкОм·м:	
закаленной бронзы	0,10
облагороженной	0,068
Температура плавления, °С	955

Таблица 12-11

Механические свойства бронзовой проволоки

ГОСТ	Марка бронзы, состояние материала	Диаметр, мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
			не менее	
5221-77	БрОЦ4-3	0,1—2,5	900	0,5
		2,5—4,0	850	1,0
		4,0—8,0	830	1,0
		8,0—12,0	780	2,0
	БрОЦ4-3 (квадратная про- аолока)	0,6—1,2	850	—
		1,2—2,0	800	—
2,0—3,0		780	1,0	
5222-72	БрКМц3-1	0,1—1,0	900	—
		1,1—2,6	900	0,5
		2,8—4,2	850	1,0
		4,5—8,0	830	1,5
		8,5—10,0	780	2,0
15834-77	БрБ2 мягкая (после закалки)	0,06—0,08	343—686	15—45
		0,10—0,50	392—637	20—45
		0,55—1,00	392—637	20—45
		1,10—5,00	392—637	25—60
		5,50—12,00	392—588	30—60
	БрБ2 твердая (холодноде- формированная после закалки)	0,06—0,08	931—1372	—
		0,10—0,50	931—1372	—
		0,55—1,00	833—1274	—
		1,10—5,00	735—1176	—
		5,50—12,00	735—1078	—
	БрБ2 после дисперсионного твердения из мягкого состояния	0,06—0,90	1078—1470	—
		1,00—12,00	1078—1568	—
	БрБ2 после дисперсионного твердения из твердого состояния	0,06—0,90	Не менее 1176	≥1,0
		1,00—12,0	Не менее 1176	≥1,0

Примечания: 1. Проволока из кремнемарганцевой бронзы круглая изготавливается всех диаметров, квадратного сечения — от 0,6 до 3,5 мм. За диаметр квадратной проволоки принимается диаметр вписанной окружности.

2. Для проволоки из бериллневой бронзы первых трех типов для механических свойств назначены граничные значения. Удельное электрическое сопротивление проволоки из бронзы марки БрБ2 должно быть: для мягкой без дисперсионного твердения 0,10 мкОм·м, после дисперсионного твердения 0,07 мкОм·м, для твердой без и после дисперсионного твердения соответственно 0,20 и 0,08 мкОм·м.

Таблица 12-12

Механические свойства прутков из бронзы

ГОСТ	Марка бронзы	Способ изготовления прутков	Диаметр, мм	Предел прочно-сти при растя-жении, МПа	Относитель-ное удлине-ние, %	Число Бригелля
				не менее		
10025-62	БрОФ6,5-0,15 БрОФ7-0,2	Тянутые	6—20 16—40	420 450	15 15	— 130—200
	БрОФ6,5-0,15 БрОФ7-0,2	Прессованные	100—110 40—95	350 370	55 55	— 70 (не менее)
6511-60	БрОЦ4-3	Тянутые	5—12 13—25 26—35 36—40	440 380 340 320	10 15 16 16	—
		Прессованные	42—120	280	25	—

Таблица 12-13

Механические свойства бронзовых полос и лент

ГОСТ	Марка бронзы	Состояние материала	Толщина, мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Виккерсу
				не менее		
1761-70	БрОФ6,5-0,15	Мягкий Полутвердый Твердый Особотвердый	—	300 450—580 580 700	38 10 5 —	—
	БрОЦ4-3	Мягкий Полутвердый Твердый Особотвердый	—	300 360—550 550 700	38 8 4 —	—
1789-70	БрБ2	Мягкий (после за- калки)	<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 400—600 400—600	— 20 30	<120
	БрБНТ1,9	Мягкий (после за- калки)	<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 400—600 400—600	— 20 30	<120
	БрБ2	Твердый (дефор- мированный после за- калки на 30—40%)	<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 600—900 650—950	— — 2,5	>170
	БрБНТ1,9		<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 600—900 650—950	— — 2,5	>160
	БрБНТ1,7		<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 600—950 600—950	— — 2,5	>150
	БрБ2	Облагороженный после закалки	<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 1100—1500 1150—1500	— — 2,0	>330
	БрБНТ1,9		<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 1100—1500 1150—1500	— — 2,0	>330
	БрБ2	Облагороженный после закалки (после деформации на 30— 40%)	<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 1150—1600 1200—1600	— — 1,5	>360
	БрБНТ1,9		<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 1150—1600 1200—1600	— — 1,5	>360
	БрБНТ1,7		<0,15 0,15—0,25 >0,25	— 1100—1500 1100—1500	— — 2,0	>340

В табл. 12-11—12-13 приведены свойства полуфабрикатов, изготовленных из проводниковых бронз, обрабатываемых давлением.

Из литейных оловянных и безоловянных бронз изготавливаются литые токоведущие детали сложной формы с удельной проводимостью, составляющей примерно 10% проводимости стандартной меди. Высокие литейные свойства бронз определяются их исключительно малой усадкой. Усадка оловянной бронзы меньше 1, тогда как усадка латуней и чугуна — около 1,5, а сталей — более 2. Легирующими элементами литейных безоловянных бронз являются алюминий, железо, марганец, никель и свинец.

12-5. АЛЮМИНИЙ

Алюминий — наиболее распространенный в природе металл. Его содержание в земной коре составляет около 7,5%, и сырьевые ресурсы практически неисчерпаемы. В связи с острой дефицитностью меди роль алюминия как проводникового металла высокой проводимости неуклонно возрастает.

Общие физические свойства алюминия

Атомный номер	13
Атомная масса	26,98
Плотность (99,5% алюминия по мас-се) при 20° С, кг/м³	2703

Достоинствами алюминия являются легкость (в 3,3 раза легче меди), высокая электрическая проводимость (удельная проводимость чистого алюминия составляет 65,5% проводимости стандартной меди), пластичность, хорошая технологичность, коррозионная стойкость.

Алюминиевый провод по сравнению с медным той же длины при одинаковом сопротивлении имеет примерно на 65% большее сечение (диаметр больше на 28%), однако он при этом будет почти в 2 раза легче. Существенно уступает алюминий меди в механической прочности.

Марки алюминия, поставляемые отечественной промышленностью в соответствии с ГОСТ 11069-74, и их химический состав приведены в табл. 12-14. Наличие примесей увеличивает удельное сопротивление алюминия. В проводниковом алюминии содержание примесей не должно превышать 0,5%. Для применения в электротехнических изделиях предусмотрены специальные мар-

Таблица 12-14

Химический состав алюминия различных марок по ГОСТ 11069-74

Марка	Al, %, не менее	Примесн, %, не более						Всего контролируемых примесей	Цветная маркировка
		Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Прочие примеси, каждой		
Алюминий особой чистоты									
A999	99,999	—	—	—	—	—	—	0,001	
Алюминий высокой чистоты									
A995	99,995	0,0015	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	Буква А голубого цвета
A99	99,99	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,01	Буква А белого цвета
A97	99,97	0,01	0,01	0,005	0,003	0,002	0,002	0,03	Буква А желтого цвета
A95	99,95	0,03	0,03	0,01	0,005	0,002	0,005	0,05	Буква А красного цвета
Алюминий технической чистоты									
A85	99,85	0,08	0,06	0,01	0,02	0,01	0,02	0,15	Одна голубая полоса
A8	99,80	0,12	0,10	0,01	0,04	0,02	0,02	0,20	Две голубые полосы
A7	99,70	0,20	0,16	0,01	0,04	0,02	0,02	0,30	Одна белая полоса
A7E	99,70	0,20	0,08	0,01	0,04	0,01*	0,02	0,30	Три желтые полосы
A6	99,60	0,25	0,20	0,01	0,06	0,03	0,03	0,40	Две белые полосы
A5	99,50	0,30	0,30	0,02	0,06	0,03	0,03	0,50	Одна красная полоса
A5E	99,50	0,35**	0,12	0,02	0,04	0,01*	0,02	0,50	Одна желтая полоса
A0	99,00	0,50	0,50	0,02	0,08	0,03	0,03	1,00	Две красные полосы

* Для суммы Ti+V+Mn+Cr.
** Железа не менее 0,18%.

Примечания: 1. В алюминии технической чистоты всех марок предприятие-изготовитель должно гарантировать содержание марганца не более 0,01% и магния не более 0,02%.
2. По соглашению сторон в алюминии высокой и технической чистоты, предназначенном для производства алюминиевых деформируемых сплавов системы алюминий — магний, содержание натрия не должно превышать 0,002%.
3. В алюминии марки А5Е допускается содержание кремния до 0,15% и суммы примесей титана, ванадия, марганца и хрома до 0,015% при условии соответствия требованиям по электросопротивлению.
4. По соглашению сторон в алюминий, поставляемый в виде слитков для обработки давлением, вводится титан в количестве до 0,1% для марок А85, А8, А7, А6 и А5 и до 0,15% для марки А0. В этих случаях при определении марки алюминия содержание титана не учитывается.

ки А5Е и А7Е (вновь введенная марка), для которых нормируется удельное сопротивление. Железо и кремний являются основными примесями, сопутствующими алюминию, причем минимальное сопротивление наблюдается при оптимальном их соотношении. В связи с этим, в частности, регламентировано минимальное содержание железа в алюминии марки А5Е. Резко снижают проводимость алюминия даже тысячные доли процента титана, ванадия, марганца и хрома. Поэтому их содержание в марках А7Е и А5Е специально ограничено.

Электрические свойства алюминия

Удельное сопротивление высокоочищенного отожженного алюминия (0,003—0,004% примесей) при 20° С, мкОм·м	0,0262
Удельная проводимость высокоочищенного отожженного алюминия при 20° С, МСм/м	38
Удельное сопротивление отожженной при 350±20° С проволоки из алюминия А5Е при 20° С, мкОм·м, не более	0,0280
Удельное сопротивление отожженной при 350±20° С проволоки из алюминия А7Е при 20° С, мкОм·м, не более	0,0277
Температурный коэффициент удельного сопротивления (0—150° С), °С ⁻¹	0,004
Отношение сопротивления расплавленного алюминия к сопротивлению твердого алюминия (при температуре плавления)	1,64
Работа выхода электронов, эВ	4,3

Холодная обработка алюминия сравнительно мало влияет на его проводимость. При обжатиях до 95—98% уменьшение удельной проводимости не превышает 1—2%.

Минцветметом в 1977 г. разработаны ТУ, распространяющиеся на цилиндрические слитки из алюминия, предназначенные для изготовления прессованных токопроводящих жил. Слитки изготавливаются из алюминия марки А5Е по ГОСТ 11069-74 и специальных марок проводникового алюминия А75К, А8К и А8КУ. Химический состав алюминия специальных марок приведен в табл. 12-15. В марках А75К и А8КУ содержание суммы примесей титан+вана-

дий+марганец+хром уменьшено по сравнению с марками А7 и А8 по ГОСТ 11069-74, снижено и содержание цинка. Удельное сопротивление прессованных жил, полученных из алюминия специальных марок, ниже, чем при применении марки А5Е, и не должно превышать указанных ниже значений:

Марка алюминия	ρ , мкОм·м
А5Е	0,0289
А75К	0,0283
А8К	0,0282
А8КУ	0,0280

Алюминий, обладая большим средством к кислороду, окисляется на воздухе, покрываясь прочной тонкой оксидной пленкой, защищающей металл от дальнейшего окисления и обеспечивающей его высокую коррозионную стойкость в атмосфере, в том числе и загрязненной. На чистый алюминий не действуют водяной пар, пресная и морская вода. С концентрированной и разбавленной азотной кислотой на холоде алюминий не взаимодействует, но растворяется при нагревании в разведенной серной и азотной кислотах. Алюминий легко растворяется в щелочах, образуя алюминаты с выделением водорода. Алюминий, обладающий по отношению к большинству металлов отрицательным электрохимическим потенциалом, в присутствии влаги склонен к разрушению вследствие электрохимической коррозии, находясь в контакте с медью, цинком, никелем, железом и многими другими металлами, с которыми он образует гальванические пары. Для защиты от этого вида коррозии места соединения алюминия с медью и другими металлами надо тщательно защищать от воздействия влаги лаковыми пленками или иными способами.

Оксидная пленка обладает электроизоляционными свойствами и создает большое переходное сопротивление в месте контакта алюминиевых проводов. Поэтому пайка алюминия обычными методами невозможна. Для пайки алюминия применяются специальные пасты-припой и ультразвуковые паяльники, разрушающие оксидную пленку. Для соединения алюминиевых проводов применяется и холодная сварка — пластическое обжатие контакта, при котором пленка окисла растрескивается и выдавливается из зоны контакта, а очищенные поверхности металла прочно соединяются.

Механические свойства алюминия зависят от чистоты металла и степени его деформации при холодной обработке. Алюминий высокой чистоты (0,004% примесей) в отожженном состоянии обладает малой прочностью, но очень пластичен: предел прочности при растяжении — около 50 МПа, относительное удлинение при разрыве примерно 50%, число Бринелля 17. После холодной деформации предел прочности возрастает до 115 МПа, твердость — до 27, а удлинение снижается до 5%. Алюминий технической чистоты с более высо-

Таблица 12-15

Химический состав специальных марок проводникового алюминия, %

Марка алюминия	Алюминий, не менее	Примеси, не более						Всего
		Fe	Si	Cu	Zn	Ti*	Прочие (каждой в отдельности)	
А75К	99,75	0,12	0,12	0,01	0,02	0,008	0,02	0,25
А8К	99,80	0,12	0,10	0,01	0,02	0,012	0,02	0,20
А8КУ	99,80	0,12	0,10	0,01	0,02	0,008	0,02	0,20

* Для суммы титан + ванадий + марганец + хром.

Т а б л и ц а 12-16

Механические свойства проводникового алюминия в зависимости от температуры

Параметры	Температура, °С											
	20	50	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250
	Твердотянутый алюминий							Отожженный алюминий (300°С, 2 ч в масле)				
Предел прочности при растяжении, МПа	147	140	132	107	83	60	29	90	78	67	50	38
Относительное удлинение, %	14	11,5	9,5	10,7	12,2	14,3	46	33,1	32,8	34,7	35,1	33,3
Сужение площади поперечного сечения, %	77,5	79,1	74,3	76,1	81,7	86,4	95,7	84,4	78,2	83,0	82,3	83,7
Модуль упругости статический, ГПа	72	65,5	64,95	54,75	55	47,3	47,7	66	65,8	56,4	56,6	58,9
Модуль упругости динамический, ГПа	65,9	60	62	61	51,7	39,1	—	53,7	41,4	—	42	40,5
Напряжение при остаточном удлинении 0,2% (предел текучести), МПа	131	127	119	86	64	40	17	44	41	44	30,3	22,6
Предел вибрационной усталости, МПа	76	67	67	41	29	16,5	—	27	25	—	19,5	15,5

ким содержанием примесей более прочен, но менее пластичен. Проводниковый алюминий, содержащий 0,5% примесей, имеет в отожженном состоянии предел прочности при растяжении 80—90 МПа, относительное удлинение 25—33%, число Бринелля 15—25. После холодной обработки предел прочности повышается до 150—250 МПа (в зависимости от степени деформации), твердость — до 33—50, а удлинение снижается до 5—14%. Типичная зависимость механических свойств проводникового алюминия, содержащего 0,5% примесей, от температуры приведена в табл. 12-16. Значительное снижение механической прочности твердотянутого алюминия начинается при температурах выше 100°С, что является следствием рекристаллизации деформированного металла. Температура рекристаллизации сильнодеформированного чистого алюминия лежит вблизи 150°С, однако при длительном нагреве рекристаллизация может наступить и при более низких температурах.

Тепловые и технологические свойства алюминия

Удельная теплопроводность при 20°С, Вт/(м·°С)	209
Удельная теплоемкость при 20°С, Дж/(кг·°С)	922
Температура плавления, °С (в зависимости от чистоты металла)	660,2—657
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100°С), °С ⁻¹	24·10 ⁻⁶
Температура кипения, °С	~2500°С
Температура отжига, °С	350—400
Температура литья, °С	700—760
Объемная усадка, %	6,5
Длительная температура эксплуатации в обмоточных проводах на воздухе, °С	300

12-6. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Алюминиевые сплавы сочетают легкость с повышенной по сравнению с алюминием механической прочностью. Элект-

рические, механические и технологические свойства сплавов можно регулировать легирующими добавками. По способу производства изделий алюминиевые сплавы делятся на деформируемые и литейные.

Для изготовления электротехнической проволоки, шин, фольги и других изделий применяются деформируемые алюминиевые сплавы, легированные одновременно добавками кремния и магния. Эти добавки мало снижают проводимость алюминия, но за счет образования соединения Mg₂Si упрочняют сплав. При температуре выше 500°С Mg₂Si находится в алюминии в твердом растворе. При быстром охлаждении, когда растворимость падает, образуется пересыщенный раствор и избыток Mg₂Si выпадает из твердого раствора в виде тонкодисперсной структурной составляющей, увеличивающей механическую прочность сплава вследствие процесса дисперсионного твердения. Выпадение избытка Mg₂Si может проходить при длительной выдержке сплава при комнатной температуре (низкотемпературное старение). Процесс ускоряется, и эффект его усиливается, если применить высокотемпературное старение — подогрев сплава до 150—200°С. В результате выхода фазы Mg₂Si из твердого раствора проводимость сплава повышается.

К системе алюминий — магний — кремний относится проводниковый сплав АВЕ, предназначенный для изготовления электротехнической проволоки. Катанка из этого сплава поставляется в соответствии с ТУ 48-5-86-74. Основными компонентами сплава АВЕ являются магний (0,45—0,65%), кремний (0,45—0,65%) и железо (сопутствующий элемент, 0,45—0,70%). Предельное содержание примесей: цинка 0,05%, меди 0,05%, прочих 0,1%. Особо,

Таблица 12-17

Алюминиевые сплавы для заливки роторов асинхронных двигателей по нормам ОАА.641.000-59

Группа	Марка сплава	Удельная проводимость при 20°С, МСм/м	Основные компоненты, %						Примеси, %, не более		
			Si	Cu	Mn	Zn	Mg	Al	Fe	Si	Cu
I	Алюминий чистый	32	—	—	—	—	—	≥99,1	0,7	0,3	0,05
II	АКМ2-1	25	1,5—2,5	1—2	—	—	—	Ост.	0,7	—	—
	АК3	25	3—4	—	—	—	—	»	0,7	—	—
III	АК10	19	9—11	—	—	—	—	»	0,7	—	—
	АКМ4-4	19	3—5	3—5	—	—	—	»	0,7	—	—
	АМг7	19	—	—	—	—	5,5—7,5	»	0,7	0,3	—
IV	АКМ12-4	15	11—13	3—4	—	—	—	»	0,7	—	—
	АКМц10-2	15	9—11	—	1,5—2	—	—	»	0,7	—	—
	АКЦ11-12	12	10—12	—	—	11—13	—	»	0,7	—	—
	АКМг1-9	12	0,8—1,3	—	—	—	8—10	»	0,7	—	—

Таблица 12-18

Физико-механические свойства алюминиевых сплавов для заливки роторов асинхронных двигателей по нормам ОАА.641.000-59

Марка сплава	Удельная проводимость, МСм/м		Средний температурный коэффициент линейного расширения (20—150°С), 10 ⁻⁶ °С ⁻¹	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С	Механические свойства на образцах, отлитых в кокиль		
	100°С	150°С				Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Число Бринелля
Алюминий чистый	24,0	21,0	23,4	2700	658	90—120	20—30	20—25
АКМ2-1	19,5	17,5	22,8	2750	580—650	100—140	6—10	35—50
АК3	19,5	17,5	23,0	2650	580—650	100—140	6—10	35—50
АК10	14,5	13,0	21,0	2600	580—600	120—140	3—5	45—60
АКМ4-4	15,5	14,5	22,9	2850	580—620	140—180	2—3	50—70
АМг7	12,5	11,5	23,5	2600	550—600	160—200	2—6	60—80
АКМ12-4	12,5	11,5	21,0	2750	540—620	140—180	1—3	50—70
АКМц10-2	12,5	11,0	21,0	2700	580—600	140—160	1—2	60—70
АКЦ11-12	10,5	10,0	21,4	3000	525—600	180—300	0,8—2	90—140
АКМг1-9	10,5	10,0	24,5	2550	550—605	160—200	0,5—1,5	70—85

Примечание. Колебания удельной проводимости ±8%.

как и у алюминия, ограничивается суммарное содержание титана, ванадия, марганца и хрома — не более 0,015%. Удельное сопротивление сплава АВЕ находится в пределах 0,0295—0,033 мОм·м, предел прочности при растяжении (после термообработки, закалки и старения) 290 МПа, относительное удлинение 5%.

Для изготовления токоведущих шин применяется проводниковый сплав АД-31 той же системы, содержащий 0,4—0,9% магния и 0,3—0,7% кремния. Шины из этого сплава закаленные, естественного (низкотемпературного) старения менее прочны, чем после искусственного (высокотемпературного) старения. Удельное сопротивление этого сплава в среднем составляет 0,034 мОм·м (после высокотемпературного старения оно несколько ниже, а после низкотемпературного — выше).

Короткозамкнутые роторы асинхронных двигателей общего назначения обыч-

но заливаются алюминием, удельная проводимость которого принимается равной 32 МСм/м с возможными отклонениями в пределах ±8%. Такие значения проводимости получаются при применении алюминия марок А5 или А7, так как в процессе расплавления и заливки роторов происходит загрязнение металла, снижающее его проводимость. Для заливки роторов двигателей с особыми характеристиками (повышенным скольжением, увеличенным пусковым моментом и др.) применяются приведенные в табл. 12-17 литейные алюминиевые сплавы с пониженной удельной проводимостью (от 25 до 12 МСм/м). Физико-механические свойства этих сплавов приведены в табл. 12-18. Температура сплавов при литье под давлением должна быть в пределах 640—700°С, а при центробежном литье 700—760°С. Сплавы марок АК10, АКМц10-2, АКМ12-4 и АКЦ11-12 обладают высокими литейными свойст-

вами. Чистый алюминий и сплавы марок АКЗ, АКМ2-1 и АКМ4-4 имеют ограниченные литейные свойства, рекомендуются для заливки роторов с тонкими стержнями. Сплавы АМг7 и АКМг1-9 имеют невысокие литейные свойства, подвержены окислению при заливке и применяются в специальных случаях.

12-7. СПЛАВЫ ВЫСОКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

К сплавам высокого сопротивления, применяемым для изготовления токоведущих частей электроизмерительных приборов и образцовых резисторов, предъявляется комплекс особых требований. Они должны иметь высокое удельное электрическое сопротивление для уменьшения размеров и массы, малый температурный коэффициент удельного сопротивления, обеспечивающий стабильность электрического сопротивления прибора или эталона при изменении их температуры, достаточную стабильность удельного сопротивления во вре-

мени, малую удельную термо-ЭДС в паре с медью для уменьшения ошибок измерения вследствие возникновения паразитных термо-ЭДС, хорошую технологичность, позволяющую получать тонкую гибкую проволоку и другие полуфабрикаты.

В значительной степени этим требованиям удовлетворяет выпускаемый в соответствии с ГОСТ 492-73 сплав на медной основе — манганин двух марок: МНМцЗ-12 и МНМцАЖЗ-12-0,3-0,3. Химический состав сплавов этих марок приведен в табл. 12-19. Основной легирующей добавкой манганина является марганец (об этом же говорит и само название сплава, так что его следует считать медно-марганцевым сплавом). Вследствие легирования марганцем зависимость электрического сопротивления манганина от температуры имеет вид параболы с максимумом вблизи комнатных температур (32—40° С), благодаря чему удельное сопротивление сплава в интервале температур —100 ÷ +100° С меняется очень мало, особенно после специальной термообработки — стабилизирующего отжига при 400° С в нейтральной среде с медленным охлаждением и последующей длительной выдержкой при комнатной температуре.

Таблица 12-19

Марки и химический состав некоторых медно-никелевых сплавов высокого сопротивления, обрабатываемых давлением (ГОСТ 492-73)

Наименование сплава	Марка	Химический состав, %						Примеси (всего), не более
		Al	Fe	Mn	Zn	Ni+Co	Cu	
Манганин	МНМцЗ-12	—	—	11,5—13,5	—	2,5—3,5	Ост.	0,9
Манганин	МНМцАЖЗ-12-0,3-0,3	0,2—0,4	0,2—0,5	11,5—13,5	—	2,5—3,5	»	0,4
Константан	МНМц40-1,5	—	—	1,0—2,0	—	39—41	»	0,9
Нейзильбер	МНЦ15-20	—	—	—	18—22	13,5—16,5	»	0,9

Таблица 12-20

Физические и технологические свойства медно-никелевых сплавов

Параметр	Манганин МНМцЗ-12 и МНМцАЖЗ-12-0,3-0,3	Константан МНМц40-1,5	Нейзильбер МНЦ15-20
Плотность (20° С), кг·м ⁻³	8400	8800	8700
Температура плавления, °С	960	1260	1080
Максимальная рабочая температура, °С	60 (в приборах)	500	200—250
Удельное электрическое сопротивление (20° С), мкОм·м	0,42—0,53	0,45—0,52	0,30—0,32
Температурный коэффициент удельного сопротивления, °С ⁻¹	$(-2 \div +25) \cdot 10^{-6}$ в диапазоне 10—40°С	$(-2 \div +6) \cdot 10^{-5}$ в диапазоне 20—100°С	$36 \cdot 10^{-5}$
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100° С), °С ⁻¹	$18 \cdot 10^{-6}$	$14,4 \cdot 10^{-6}$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
Удельная термо-ЭДС в паре с медью (в диапазоне 0—100° С), мкВ/°С	0,9—1	42,8	14,4
Удельная термо-ЭДС в паре с железом (в диапазоне 0—100° С), мкВ/°С	—	54	—

Таблица 12-21

Электрическое сопротивление манганиновой проволоки (ГОСТ 10155-75)

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сопротивление 1 м проволоки, Ом	
	мягкой	твердой
0,020	—	1370,0—2340,0
0,025	—	876,0—1390,0
0,030	—	608,0—927,0
0,040	—	342,0—551,0
0,050	214,0—327,0	219,0—333,0
0,060	149,0—219,0	152,0—223,0
0,070	109,0—157,0	112,0—160,0
0,080	83,6—118,0	85,6—120,0
0,090	66,0—91,7	67,6—93,6
0,10	53,5—87,6	54,8—89,2
0,12	37,1—57,9	38,1—59,0
0,14	27,3—41,2	27,9—41,9
0,15	23,8—35,4	24,4—36,0
0,16	20,9—33,8	21,4—34,5
0,18	16,5—25,4	16,9—26,4
0,20	13,4—20,5	13,7—20,9
0,22	11,1—16,6	11,3—16,9
0,25	8,58—12,5	8,76—12,8
0,28	6,82—9,59	6,98—9,95
0,30	5,94—8,45	6,09—8,62
0,35	4,37—5,27	4,47—5,33
0,36	4,12—5,91	4,23—6,02
0,38	3,71—5,26	3,79—5,33
0,40	3,35—4,71	3,42—4,81
0,45	2,64—3,67	2,71—3,74
0,50	2,14—2,94	2,19—2,99
0,55	1,77—2,41	1,81—2,46

Продолжение табл. 12-21

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сопротивление 1 м проволоки, Ом	
	мягкой	твердой
0,56	1,71—2,32	1,75—2,36
0,60	1,49—2,03	1,52—2,04
0,63	1,35—1,84	1,38—1,88
0,65	1,27—1,73	1,30—1,76
0,70	1,09—1,48	1,12—1,51
0,75	0,951—1,28	0,974—1,30
0,80	0,833—1,12	0,856—1,14
0,85	0,740—0,986	0,758—1,00
0,90	0,660—0,876	0,676—0,892
1,03	0,536—0,719	0,548—0,733
1,10	0,443—0,590	0,453—0,601
1,20	0,371—0,493	0,381—0,502
1,30	0,317—0,418	0,324—0,426
1,40	0,273—0,353	0,279—0,365
1,50	0,238—0,311	0,244—0,317
1,60	0,209—0,272	0,214—0,278
1,70	0,185—0,240	0,189—0,245
1,80	0,165—0,214	0,169—0,218
1,90	0,148—0,192	0,152—0,195
2,00	0,134—0,176	0,137—0,180
2,20	0,111—0,145	0,113—0,147
2,50	0,0856—0,111	0,0876—0,113
2,80	0,0683—0,0882	0,0699—0,0899
3,00	0,0595—0,0765	0,0609—0,0781
3,60	0,0418—0,0534	0,0423—0,0545
4,00	0,0335—0,0431	0,0343—0,0439
4,50	0,0265—0,0339	0,0271—0,0346
5,00	0,0214—0,0273	0,0219—0,0279
6,00	0,0149—0,0183	0,0152—0,0192

Таблица 12-22

Свойства некоторых полуфабрикатов, изготовленных из манганина

ГОСТ, ТУ	Марка сплава и вид изделия	Состояние материала	Удельное электрическое сопротивление при 20°C, мкОм·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, °C ⁻¹	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
ГОСТ 10155-75	Проволока из МНМцАЖ3-12-0,3-0,3 и МНМц3-12: диаметр 0,05—0,09 мм диаметр 0,10—6,0 мм МНМц3-12 диаметр 0,05—6,0 мм	Мягкий » Твердый	0,47±0,05 0,48±0,05	(-2÷+10)·10 ⁻⁶ (10—25)·10 ⁻⁶	—	≥10 ≥15 ≤9
ТУ 48-21-219-72	Полосы толщиной 0,5—2,5 мм и шириной 50—300 мм из: МНМц3-12 МНМцАЖ3-12-0,3-0,3	Мягкий »	0,42—0,50 —	(-6÷+6)·10 ⁻⁵ (-1,5÷+1,5)·10 ⁻⁵	360—500 —	≥25 —

Таблица 12-23

Электрическое сопротивление константановой проволоки (ГОСТ 5307-77)

Диаметр проволоки, мм	Электрическое сопротивление 1 м проволоки, Ом	
	мягкой при удельном сопротивлении 0,45—0,48 мкОм·м	твердой при удельном сопротивлении 0,46—0,52 мкОм·м
0,020	—	1465—2290,75
0,025	—	936,86—1253,01
0,030	—	650,64—844,16
0,040	—	365,95—458,55

Продолжение табл. 12-23

Диаметр проволоки, мм	Электрическое сопротивление 1 м проволоки, Ом	
	мягкой при удельном сопротивлении 0,45—0,48 мкОм·м	твердой при удельном сопротивлении 0,46—0,52 мкОм·м
0,050	—	234,36—312,88
0,060	—	162,72—211,12
0,070	—	119,54—156,72
0,080	—	91,51—117,70
0,090	—	72,30—91,68
0,10	57,33—95,48	53,60—103,88
0,12	39,79—61,15	40,67—66,24

Продолжение табл. 12-23

Диаметр проволоки, мм	Электрическое сопротивление 1 м проволоки, Ом	
	мягкой при удельном сопротивлении 0,45—0,48 мкОм·м	твердой при удельном сопротивлении 0,46—0,52 мкОм·м
0,14	29,24—42,44	29,89—45,98
0,15	25,47—36,17	26,03—39,19
0,16	22,38—31,19	22,87—33,79
0,18	17,68—23,87	18,08—25,86
0,20	14,32—18,86	14,64—20,43
0,22	11,84—15,28	12,10—16,55
0,25	9,17—11,55	9,37—12,52
0,28	7,31—9,04	7,47—9,80
0,30	6,37—7,80	6,51—8,44
0,33	5,26—6,37	5,38—6,89
0,35	4,68—5,61	4,78—6,08
0,38	3,97—4,72	4,06—5,11
0,40	3,58—4,23	3,66—4,59
0,45	2,83—3,51	2,89—3,58
0,50	2,29—2,65	2,34—2,87
0,55	1,89—2,18	1,94—2,36
0,60	1,59—1,82	1,63—1,97
0,65	1,36—1,59	1,39—1,72
0,70	1,17—1,36	1,20—1,48
0,75	1,02—1,18	1,04—1,28
0,80	0,895—1,03	0,915—1,12
0,85	0,793—0,909	0,811—0,985
0,90	0,707—0,807	0,723—0,875
1,00	0,573—0,663	0,586—0,718
1,10	0,474—0,544	0,484—0,589
1,20	0,398—0,454	0,407—0,492
1,30	0,339—0,385	0,347—0,417
1,40	0,292—0,330	0,299—0,358
1,50	0,255—0,287	0,260—0,311
1,60	0,224—0,251	0,229—0,272
1,70	0,198—0,222	0,203—0,240
1,80	0,177—0,197	0,181—0,214
1,90	0,158—0,177	0,162—0,191
2,00	0,143—0,162	0,146—0,176
2,25	0,113—0,127	0,116—0,138
2,50	0,0917—0,103	0,0937—0,111
2,75	0,076—0,084	0,077—0,092
3,00	0,064—0,071	0,065—0,077
3,50	0,047—0,052	0,048—0,057
4,00	0,036—0,040	0,037—0,043
4,50	0,028—0,031	0,029—0,034
5,00	0,023—0,025	0,023—0,027

удельного сопротивления. Добавки алюминия и железа в манганин марки МНМцАЖЗ-12-0,3-0,3 оказывают стабилизирующее влияние на удельное сопротивление сплава, существенно снижая температурный коэффициент удельного сопротивления. Некоторые физические и технологические свойства манганина приведены в табл. 12-20. Малое значение удельной термо-ЭДС в паре с медью и высокая стабильность электрического сопротивления во времени и с изменением температуры являются преимуществами манганина при изготовлении образцовых резисторов и электроизмерительных приборов самых высоких классов точности.

Хорошая технологичность позволяет изготавливать из манганина проволоку, полосы, фольгу. В соответствии с ГОСТ 10155-75 проволока манганиновая неизолированная изготавливается диаметром от 0,02 до 6,00 мм. По состоянию материала проволока должна изготавливаться: твердой — из манганина марки МНМцЗ-12 всех диаметров, мягкой — из манганина марок МНМцЗ-12 и МНМцАЖЗ-12-0,3-0,3 диаметром 0,5 мм и более. Проволока диаметром менее 0,5 мм в мягком состоянии поставляется по соглашению изготовителя с потребителем. Электрическое сопротивление манганиновой проволоки в зависимости от температуры в пределах от 10 до 40°C вычисляются по формуле

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t - 20) + \beta (t - 20)^2],$$

где R_{20} — сопротивление образца при 20°C, Ом; α и β — температурные коэффициенты, значения которых для отожженных образцов должны находиться в пределах:

Марка сплава	α , $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	β , $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$
МНМцАЖЗ-12-0,3-0,3	От -2 до +10	От -1,5 до 0,5
МНМцЗ-12	От -10 до +25	—

Электрическое сопротивление 1 м манганиновой проволоки различных диаметров приведено в табл. 12-21 (граничные значения сопротивления для каждого размера проволоки определены с учетом предельных отклонений по диаметру и удельному электрическому сопротивлению). Некоторые свойства проволоки и полос, изготовленных из манганина, даны в табл. 12-22. Из манганина марки МНМцАЖЗ-12-0,25-0,2 производится фольга толщиной 0,010 мм и шириной 270 мм для изготовления измерительных резисторов высокой точности (ТУ 48-21-229-72).

Широко распространен в электротехнике медно-никелевый сплав константан, выпускаемый в соответствии с ГОСТ 492-73 под маркой МНМц40-1,5, состав которого приведен в табл. 12-19. Входящий в состав сплава марганец является хорошим раскислителем, он же нейтрализует вредное действие серы, благоприятно влияя на технологические свойства. Константан обладает многими положительными качествами. Само название подчеркивает практическую независимость его удельного электрическо-

Стабилизирующая обработка обеспечивает практическую неизменность сопротивления сплава во времени и с изменением температуры (весьма малый температурный коэффициент удельного сопротивления — около $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Стабилизированный манганин нежелательно нагревать во время эксплуатации выше +60°C во избежание изменения его свойств, хотя сплав свободно может выдерживать 200—300°C. Введение никеля снижает удельную термо-ЭДС манганина в паре с медью и сдвигает максимум температурной зависимости сопротивления сплава в область более низких температур. Наличие в сплаве никеля послужило основанием для причисления манганина к медно-никелевым сплавам, марки которых пачинаются буквами МН, хотя никель и не является основным легирующим элементом. Никель образует с медью твердый раствор в любом соотношении, повышая механическую прочность меди, коррозионную стойкость, удельное электрическое сопротивление, снижает температурный коэффициент

Таблица 12-24

Свойства полуфабрикатов, изготовленных из константана и нейзильбера

ГОСТ, ТУ	Марка сплава, вид изделия	Состояние материала	Удельное электрическое сопротивление при 20° С, мКОМ·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, °С ⁻¹	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
ГОСТ 5307-77	МНМц40-1,5, проволока диаметром: 0,020—5,00 мм 0,10 —0,45 мм 0,50 —5,00 мм	Твердый Мягкий Мягкий }	0,490±0,030 0,465±0,015	(-2÷+6)·10 ⁻⁵ в диапазоне 20—100°С	≥650 450—650 450—650	— 15 20
ГОСТ 1791-67	МНМц40-1,5, проволока для удлиняющих проводов к термопарам диаметром: 0,2 и 0,3 мм 0,4—2,5 мм	Мягкий Мягкий }	0,465±0,015	—	≥400	10 15
ГОСТ 5189-75	МНМц40-1,5, ленты шириной от 6 до 300 мм и толщиной 0,1—2 мм	Мягкий Твердый }	0,45—0,51	—	400—600 ≥650	—
ТУ 48-21-213-72	МНМц40-1,5, полосы шириной 40 мм и кратной ей: толщиной 2,0 и 2,5 мм толщиной 2,0 мм	Мягкий Твердый }	0,45—0,51	—	400—600 ≥650	—
ТУ 48-21-144-72	МНМцЖ40-1,4-0,45 и МНМцЖ40-1,25-0,55, фольга тензорезистивная: ширина 60—80 мм, толщина 0,003 мм ширина 80—100 мм, толщина 0,005—0,01 мм	Твердый Твердый }	0,46—0,51	(-20÷-30)·10 ⁻⁶ для МНМцЖ40-1,4-0,45; (-3÷-13)·10 ⁻⁶ для МНМцЖ40-1,25-0,55	—	—
ГОСТ 5220-78	МНЦ15-20, проволока диаметром: 0,1 —0,20 0,25—0,50 0,60—1,00 1,10—5,0 0,6 —1,00 1,1 —5,0 0,1 —2,00 2,2 —5,0	Мягкий Полутвердый Твердый	— — —		≥350 ≥450 700—1100 ≥550	15 20 25 30 3 5 — —
ГОСТ 5063-73	МНЦ15-20, полосы шириной 40—500 мм, толщина 0,5—10 мм (особотвердые—до 4 мм)	Мягкий Твердый Особо - твердый	— — —		≥350 ≥550 ≥650	35 1 1

го сопротивления от температуры. Температурный коэффициент удельного сопротивления у сплава по абсолютной величине может быть $2 \cdot 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ и даже меньше. Константан сочетает высокую механическую прочность с пластичностью, что позволяет получать из него тончайшую проволоку, фольгу, ленты, полосы. По жаростойкости константан превосходит манганин, и это дает возможность применять его в реостатах и нагревательных элементах, работающих при температуре до 500°C , однако широкое применение константана для таких целей ограничено большим содержанием в составе сплава дорогого и дефицитного никеля. Некоторые свойства константана приведены в табл. 12-20. Существенно отличается константан от манганина высоким значением удельной термо-ЭДС в паре с медью, что не позволяет применять константан в высокоточных электроизмерительных системах и приборах. Благодаря значительной термо-ЭДС в паре с медью и железом константан нашел применение для изготовления термпар. Термпары медь — константан используются для измерения температур до $300\text{--}350^{\circ}\text{C}$, а железо — константан — до 600°C (при кратковременном нагреве до 800°C).

В соответствии с ГОСТ 5307-77 выпускается проволока константановая неизолированная круглого сечения, применяемая для электротехнических целей и предназначенная для работы при температуре не выше 500°C . Проволоку диаметром от 0,02 до 5,00 мм изготавливают из константана марки МНМц40-1,5. По состоянию металла проволока должна быть: диаметром 0,09 мм и менее — твердой, диаметром свыше 0,09 мм — твердой или мягкой. Электрическое сопротивление 1 м константановой проволоки различных диаметров приведено в табл. 12-23. Некоторые свойства проволоки и других полуфабрикатов, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 12-24. После нагревания константановой проволоки до 900°C в течение 2—3 с на ее поверхности образуется пленка окислов, обладающая электроизоляционными свойствами. Проволоку с такой изоляцией можно навивать плотно виток к витку, если напряжение между соседними витками не превышает 1 В.

Для изготовления реостатов, контактных пружин и других электротехнических целей находит применение медно-никелевый сплав нейзильбер марки МНЦ15-20, химический состав которого в соответствии с ГОСТ 492-73 приведен в табл. 12-19. Благодаря значительному содержанию цинка нейзильбер дешевле константана, но существенно уступает ему в свойствах — имеет меньшее удельное электрическое сопротивление и больший температурный коэффициент удельного сопротивления. Допустимая рабочая температура нейзильбера $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$, так как при более высоких температурах вследствие диффузии цинка к границам зерен сплава изделие стано-

вится хрупким. Свойства нейзильбера приведены в табл. 12-20. Нейзильбер, внешне напоминающий серебро (чем и объясняется его название), отличается высокой механической прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью. После холодной деформации сплав приобретает достаточную упругость. Свойства проволоки и прутков из нейзильбера, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 12-24. В соответствии с ТУ 48-08-428-71 из нейзильбера производятся ленты твердые, повышенной точности, толщиной 0,13 мм для изготовления контактных пружин.

12-8. ЖАРОСТОЙКИЕ СПЛАВЫ ВЫСОКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Жаростойкие сплавы высокого сопротивления применяются для изготовления электронагревательных элементов, длительно работающих в воздушной среде при температурах 1000°C и выше, а также проволочных или ленточных резисторов. Помимо высокого удельного электрического сопротивления и его малого температурного коэффициента эти материалы должны отличаться высокой жаростойкостью — способностью противостоять химическому разрушению поверхности под воздействием воздуха или иных газообразных сред при высоких температурах. Они должны иметь удовлетворительные технологические свойства, позволяющие получать проволоку, ленты, прутки и другие полуфабрикаты, обладать свариваемостью, а также иметь достаточную жаропрочность — способность выдерживать механические нагрузки без существенных деформаций, не разрушаясь при высоких температурах. Желательно, чтобы сплавы, предназначенные для изготовления изделий массового производства, были дешевыми и не содержали дефицитных компонентов.

Жаростойкость сплава обеспечивается устойчивостью в широком диапазоне температур образующихся на поверхности окислов и других продуктов газовой коррозии, а также плотностью пленки окислов, защищающей внутренние слои материала от дальнейшего окисления. Сплошной окисный слой будет образовываться в том случае, если объем окисла будет превосходить объем вошедшего в состав окисла металла. Через окисную пленку не должна происходить диффузия кислорода, а также диффузия металла в пленку, что равносильно безостановочному окислению глубинных слоев сплава. Металлами, окислы которых обладают такими свойствами, являются никель, хром и алюминий. Поэтому они входят в состав распространенных хромоникелевых и хромалюминиевых жаростойких сплавов высокого сопротивления. Марки и химический состав жаростойких и жаропрочных сплавов высокого сопротивления, выпускаемых промышленностью, приведены в табл.

Т а б л и ц а 12-25

Марки и химический состав жаростойких и жаропрочных сплавов высокого сопротивления

ГОСТ	Марка сплава	Химический состав, %									Прочие
		Углерод	Марганец	Si	Cr	Ni	Al	Fe	S	P	
12766,1-77- 12766,4-77 и 10994-79	X13Ю4	0,15	0,7	≤1,0	12,0-15,0	≤0,6	3,5-5,5	Ост.	0,025	0,035	—
	X23Ю5	0,06	0,5	≤0,7	21,5-24,5	≤0,6	4,5-5,5	»	0,020	0,025	—
	X23Ю5Т	0,05	0,3	≤0,6	21,5-23,5	≤0,6	4,6-5,3	»	0,015	0,020	—
	X27Ю5Т	0,05	0,3	≤0,6	26,0-28,0	≤0,6	5,0-5,8	»	0,015	0,020	—
	X25Н20	0,15	2,0	≤1,0	24,0-27,0	17,0-20,0	—	»	0,020	0,030	—
	X15Н80	0,15	1,5	0,4-1,5	15,0-18,0	55,0-61,0	≤0,2	»	0,020	0,030	—
	X15Н60-Н	0,10	0,6	1,0-1,5	15,0-18,0	55,0-61,0	≤0,2	»	0,020	0,030	—
	X20Н80	0,15	0,7	0,4-1,5	20,0-23,0	Ост.	≤0,2	≤1,5	0,020	0,030	—
	X20Н80-Н	0,10	0,6	1,0-1,5	20,0-23,0	»	≤0,2	≤1,2	0,020	0,030	—
5632-72	ХН60Ю	0,10	0,3	≤0,8	15,0-18,0	55,0-58,0	2,6-3,5	Ост.	0,020	0,020	Барий ≥0,10; церий ≥0,03
	ХН70Ю	0,10	0,3	≤0,8	26,0-29,0	Ост.	2,8-3,5	≤1,0	0,012	0,015	Барий ≥1,10; церий ≥0,03
	ХН77ТЮР	0,07	0,3	≤0,6	19,0-22,0	»	0,6-1,0	≤4,0	0,007	0,015	Титан 2,4-2,8; бор ≥0,01; церий ≥0,02

Т а б л и ц а 12-26

Основные свойства и области применения жаростойких сплавов высокого сопротивления

Марка сплава	Рабочая температура нагревательного элемента		Характеристика окислостойкости и жаропрочности	Преимущественные области применения
	предельная	оптимальная		
X13Ю4	1000	900	Окалиностойки в окислительной атмосфере и в атмосфере, содержащей серу и сернистые соединения; склонны к провисанию при высоких температурах	Проволока и лента для реостатов, нагревательных элементов, бытовых приборов и аппаратов
X23Ю5Т	1200	1175		Проволока и лента для промышленных и лабораторных печей, бытовых приборов и аппаратов, реостатов и др.
X27Ю5Т	1300	1250		Проволока и лента для высокотемпературных промышленных и лабораторных печей
X25Н20	1000	900	Окалиностойки в окислительной атмосфере, водороде, вакууме; неустойчивы в атмосфере, содержащей серу и сернистые соединения; более жаропрочны, чем хромоалюминиевые сплавы	Проволока для промышленных и бытовых печей, бытовых приборов
X15Н60	1000	950		Проволока и лента для промышленных электрических аппаратов теплового действия, реостатов и бытовых приборов
X15Н60-Н	1100	1050		Проволока и лента для промышленных и лабораторных печей, электрических аппаратов теплового действия и бытовых приборов
X20Н80	1100	1050		Проволока и лента для промышленных электрических аппаратов теплового действия, реостатов, резисторов, микропроводов и бытовых приборов
X20Н80-Н	1200	1150		Проволока и лента для промышленных и лабораторных печей, электрических аппаратов теплового действия и бытовых приборов

Таблица 12-27			
Основные свойства жаропрочных сплавов высокого сопротивления (ГОСТ 5632-72)			
Марка сплава	Удельное сопротивление при 20°С, мкОм·м	Рабочая температура, °С	Окружающая среда
ХН60Ю ХН70Ю	1,209 1,338	1100—1200 1100—1200	Воздух, вакуум, защитные среды в отсутствие сернистых соединений Вакуум, защитные среды в отсутствие сернистых соединений
ХН77ТЮР	1,270	1000—1100	

Таблица 12-28								
Физические свойства жаростойких сплавов с высоким электрическим сопротивлением								
Параметр	Х13Ю4	Х15Ю5	Х23Ю5	Х23Ю5Т	Х27Ю5Т	Х15Н60, Х15Н60-Н	Х20Н80, Х20Н80-Н	ХН70Ю
Плотность, кг/м³	7300	7280	7250	7210	7190	8200	8400	7900
Температура плавления, °С	1500	1500	1500	1500	1500	1390	1400	1390
Структура	Ферритная Магнитные			Аустенитная Немагнитные				
Магнитность								
Число Бринелля	140—200	150—200	180—250	200—250	200—250	140—150	140—150	—
ТК линейного расширения, 10 ⁻⁶ °С ⁻¹ , в интервале 20—1000°С	15	16	15	15	15	17	18	21
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	12,6	16,8	12,6
Теплоемкость, 10 ⁻³ Дж/(кг·°С)	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,504	0,462

Таблица 12-29

Удельное сопротивление жаростойких сплавов

Марка	Удельное сопротивление при 20°С, мкОм·м
Х13Ю4	1,18—1,34
Х15Ю5	1,24—1,34
Х23Ю5	1,30—1,40
Х23Ю5Т	1,34—1,45
Х27Ю5Т	1,37—1,47
Х25Н20	0,83—0,96
Х15Н60, Х15Н60-Н	1,06—1,17
Х20Н80, Х20Н80-Н	1,04—1,17
ХН70Ю	1,25—1,35

Таблица 12-30

Температурный коэффициент удельного сопротивления некоторых жаростойких сплавов, °С⁻¹ (ГОСТ 12766.1-77)

Марка сплава	Интервал температур		
	от—60 до +20°С	от +20 до 60°С	от 60 до 100°С
Х23Ю5	1,4·10 ⁻⁵	1,3·10 ⁻⁵	2,0·10 ⁻⁵
Х15Н60	1,4·10 ⁻⁴	1,5·10 ⁻⁴	1,6·10 ⁻⁴
Х20Н80	1,0·10 ⁻⁴	0,9·10 ⁻⁴	0,9·10 ⁻⁴

Таблица 12-31

Механические свойства жаростойких и жаропрочных сплавов при кратковременных испытаниях на разрыв

Марка сплава	Температура испытаний, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Х23Ю5, Х23Ю5Т	20	645	540	23	72
	400	608	431	16	53
	600	372	352	30	79
	800	117	—	58	94
	1000	17	—	122	96
	1200	9	—	—	—
Х27Ю5Т	20	663	534	16	—
	200	660	425	24	63
	400	605	357	26	53
	600	375	354	33	72
	800	87	—	76	97
	1000	13	—	127	—
Х15Н60, Х15Н60-Н	1200	9	—	118	—
	20	645	264	32	60
	600	402	254	23	40
	700	284	226	30	52
	800	166	127	33	51
	900	108	—	24	45
	1000	59	—	36	44
	1100	38	—	20	34
	1200	28	—	17	33

12-25. Для обозначения марок сплавов применяются композиции из букв и чисел. Буквы означают названия наиболее характерных элементов, входящих в состав сплава (Н — никель, Х — хром, Ю — алюминий, Т — титан и т. п.), а число после буквы — примерное содержание данного компонента в процентах по массе. Дополнительные цифры и буквы в начале или конце марки

Продолжение табл. 12-31

Марка сплава	Температура испытаний, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Х20Н80, Х20Н80-Н	20	656	—	45,4	61
	700	431	—	40,0	40
	800	215	—	70,1	73
	900	92	—	55,0	82
	1000	71	—	70,0	63
	1100	35	—	130,0	93
	1150	27	—	110,0	97
	1200	22	—	101,8	98
ХН70Ю	20	813	—	—	—
	700	540	—	—	—
	800	392	—	—	—
	900	135	—	—	—
	1000	79	—	—	—
	1100	43	—	—	—
	1200	32	—	—	—

характеризуют повышенное (или пониженное) качество марок сплава, близких по составу.

Хромоникелевые сплавы (ранее нихромы) сочетают высокую жаростойкость с хорошей технологичностью, что позволяет получать из них тонкую проволоку и ленту, причем сплавы с ограниченным содержанием хрома (15—20%) более технологичны. Преимуществом хромоникелевых сплавов перед хромсодержащими является более высокая жаропрочность, недостатком — значительное содержание в них дефицитного никеля (55—80%). С целью удешевления за счет частичной замены никеля в состав хромоникелевых сплавов вводят до 25—50% железа, что снижает жаростойкость этих сплавов, называемых иногда ферронихромами.

Хромоалюминиевые сплавы, практически не содержащие никеля, намного дешевле нихромов и отличаются от них повышенной жаростойкостью, более высоким удельным электрическим сопротивлением (до $2 \text{ мкОм} \times \text{X м}$ и более) и пониженным температурным коэффициентом удельного сопротивления. Однако они более тверды и хрупки, чем нихромы, и поэтому менее технологичны: хуже обрабатываются деформацией, особенно в холодном состоянии, что не позволяет изготавливать из них такой тонкой проволоки и ленты, как из нихромов. Сплавы с повышенным содержанием железа (Х13Ю4), называвшийся ранее фехралем, более технологичен, чем сплавы с более высоким содержанием хрома (23—27%), называвшиеся хромалиями: с увеличением добавок хрома и алюминия растут жаростойкость и одновременно твердость и хрупкость сплава. Менее жаростойкий из-за высокого содержания железа фехраль имеет более высокий температурный коэффициент удельного сопротивления ($1,5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), чем хромали Х23Ю5, Х23Ю5Т и Х27Ю5Т.

Электрические, физические и механические свойства, рабочие температуры, характеристика окислительности (жаростойкости) и жаропрочности, а также сведения об областях применения жаростойких и жаропрочных сплавов высокого сопротивления приведены в табл. 12-26—12-31. Ввиду сложного характера зависимости электрического сопротивления жаростойких сплавов от температуры в широком диапазоне ее изменения для расчетов рекомендуется пользоваться поправочными коэффициентами, приведенными в табл. 12-32. Поправочный коэффициент представляет собой отношение электрического сопротивления сплава при температуре нагрева к его сопротивлению при 20°C.

В табл. 12-33 указаны предельные размеры проволоки, прутков и ленты, изготавливаемых из жаростойких сплавов. Диаметры холоднотянутой проволоки должны соответ-

Таблица 12-32

Поправочные коэффициенты для расчета электрического сопротивления жаростойких и жаропрочных сплавов в зависимости от температуры

Марка сплава	Температура нагрева, °С														
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
X15H60	1,000	1,013	1,029	1,046	1,062	1,074	1,083	—	—	—	—	—	—	—	—
X15H60-H	1,000	1,013	1,029	1,046	1,062	1,074	1,083	1,083	1,089	1,097	1,105	1,114	—	—	—
X20H80	1,000	1,006	1,016	1,024	1,031	1,035	1,026	1,019	1,017	1,021	1,028	1,038	—	—	—
X20H80-H	1,000	1,006	1,015	1,022	1,029	1,032	1,023	1,016	1,015	1,017	1,025	1,033	1,040	—	—
X13Ю4, X15Ю5	1,000	1,004	1,013	1,025	1,041	1,062	1,090	1,114	1,126	1,135	1,144	—	—	—	—
X23Ю5, X23Ю5Т	1,000	1,002	1,007	1,013	1,022	1,036	1,056	1,063	1,067	1,072	1,076	1,079	1,080	1,083	1,086
X27Ю5Т	1,000	1,002	1,005	1,010	1,015	1,025	1,030	1,033	1,035	1,040	1,040	1,041	1,043	1,045	—
XH60Ю	1,000	—	0,984	1,000	1,022	1,040	1,021	1,012	1,008	1,013	1,015	1,031	—	—	—
XH70Ю	1,000	1,004	—	—	—	1,051	1,052	1,035	1,015	1,015	1,016	1,021	1,028	—	—

Таблица 12-33

Таблица 12-34

Предельные размеры проволоки, прутков и ленты из жаростойких сплавов

Марка сплава	Проволока холоднотян- утая	Пру- тки	Лента холодно- катаная	
	Диаметр, мм		Толщина, мм	Шири- на, мм
X13Ю4, X15Ю5 X23Ю5, X23Ю5Т X27Ю5Т X25Н20 X15Н60 X15Н60-Н X20Н80 X20Н80-Н XН70Ю	0,2—7,5 0,3—7,5 0,5—5,5 0,2—7,5 0,3—7,5 0,1—7,5 0,4—7,5 0,1—7,5 1,0—7,0	13—30 13—25 13—25 13—25 — 13—16 13—16 13—16 13—26	0,2—3,2 0,2—3,2 0,2—3,2 — 0,1—3,2 0,1—3,2 0,1—3,2 0,1—3,2 —	6—80 6—80 6—80 — 6—260 6—250 6—250 6—250 —

Примечания: 1. Из сплавов X23Ю5, X23Ю5Т и X27Ю5Т изготавливается горячекатаный квадрат со стороной 5 мм в мотках.

2. Из всех сплавов изготавливается горячекатаный прокат диаметром 6—12 мм в мотках.

3. Из всех сплавов, кроме XН70Ю, изготавливается калиброванная холодно- или теплоотянутая проволока диаметром 8—10 мм в мотках.

ствовать ГОСТ 2771-57 (группам размеров II и III), диаметры горячекатаной проволоки и прутков — ГОСТ 2590-71, а размеры плющеной ленты — ГОСТ 10234-77.

В соответствии с ГОСТ 8803-77 поставляется проволока нихромовая микронных размеров с номинальными диаметрами от 0,009 до 0,4 мм. Проволока диаметром 0,10 мм и больше готовится из сплавов марок X20Н80 и X15Н60, а диаметром 0,009—0,09 мм — только из сплава X20Н80-ВН.

12-9. СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ И КРИОПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сверхпроводниковыми материалами называются материалы, обладающие свойством сверхпроводимости (см. § 3-4).

Для использования в энергетике, электромеханике и в других целях представляют интерес сверхпроводниковые материалы с высокими критическими параметрами, относящиеся по своей природе к сверхпроводникам III рода. Для сверхпроводников III рода, или так называемых неидеальных сверхпроводников II рода, характерно наличие большого количества дефектов структуры (физических и химических неоднородностей, превышающих атомный размер), создаваемых специальной технологией изготовления. В результате эти материалы могут без потерь пропускать постоянные токи высокой плотности в присутствии сильного поперечного магнитного поля. Выпускаемые промышленностью сверхпроводниковые ма-

Марка сплава	К Т, К	В _{кр} при 4,2 К, Тл	Критическая плотность то- ка при 3,5 Тл, А/см²	Технические условия
65БТ 50БТ	9,7 8,5	7,5—9 10,5—12	(5—10)·10 ⁴ (5—8)·10 ⁴	ЧМТУ 1-29-66 ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1458-67
35БТ	8,0	10—11	(5—10)·10 ⁴	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1489-69

териалы такой природы являются либо сплавами типа твердых растворов, либо интерметаллическими соединениями. Сплавы отличаются пластичностью и поэтому легко перерабатываются в изделия, хорошо деформируясь в горячем и холодном состояниях. Интерметаллические соединения имеют более высокие критические параметры, но хрупки.

К двухкомпонентным сплавам системы ниобий—циркий относится отечественный сплав марки НЦ-50, содержащий 50% циркония. Его критическая температура 10,5 К, при 4,2 К критическая магнитная индукция составляет 8,7 Тл, а критическая плотность тока $1 \cdot 10^5$ А/см² (при 5 Тл). В настоящее время ниобий-циркониевая проволока вытесняется проволокой из ниобий-титановых сплавов, имеющих более высокие свойства. Сплав марки НТ-50, содержащий 50% титана, имеет критическую температуру 9,5 К. При 4,2 К его критическая магнитная индукция составляет 11 Тл, а критические плотности тока $3 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^4$ А/см² (при индукциях 5 и 10 Тл соответственно). Для создания магнитных систем также применяются трехкомпонентные сплавы системы никель—титан—циркий. Отечественные сплавы этого типа имеют марки 35БТ, 50БТ и 65БТ, которые содержат по массе 35, 50 и 65% ниобия и от 25 до 64% титана (остальное — циркий и другие компоненты). Нормируемые свойства этих сплавов см. в табл. 12-34.

Сплав 65БТ отличается наибольшей критической температурой и плотностью тока. Сплав 50БТ обладает наивысшей критической магнитной индукцией. Сплав 35БТ отличается высоким удельным электрическим сопротивлением в нормальном состоянии ($1,18—1,25$ мкОм·м при 300 К), высокой пластичностью и удельной ударной вязкостью при криогенных температурах (20—77 К).

Из числа интерметаллических соединений широко промышленное применение нашел станид ниобия (Nb_3Sn), имеющий критическую температуру 18,2 К. При 4,2 К его критическая магнитная индукция 24,5 Тл, а критические плотности тока составляют $(1,5—2) \cdot 10^6$ А/см² при $B=5$ Тл, $1 \cdot 10^6$ А/см² при $B=10$ Тл, $(0,7—1) \cdot 10^6$ А/см²

при $B=15$ Тл и $(3-5) \cdot 10^4$ А/см² при $B=20$ Тл. На основе этого материала созданы магнитные системы с весьма высокой магнитной индукцией. Хотя станиды ниобия очень хрупки, на его основе по специальной технологии производятся плоские и скрученные сверхпроводящие провода.

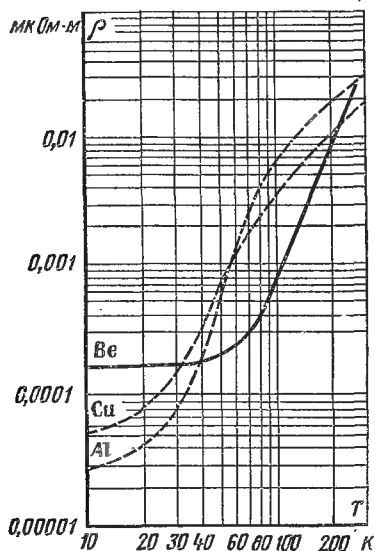


Рис. 12-2. Зависимость удельного электрического сопротивления алюминия, меди и бериллия от температуры.

Криопроводниковыми материалами называются металлы, применяемые при глубоком охлаждении (при криогенных температурах), когда они приобретают высокую электрическую проводимость, хотя и не переходят в сверхпроводящее состояние (если даже относятся к сверхпроводникам). Эти материалы используются, в частности, для изготовления токопроводящих жил криопроводящих проводов и кабелей, работающих при температурах жидкого водорода (20,4 К), неона (27,3 К), азота (77,4 К). При сильном охлаждении, когда составляющая удельного электрического сопротивления металла, обусловленная рассеянием электронов тепловыми колебаниями решетки, пренебрежимо мала, остаточное удельное сопротивление, не зависящее от температуры, определяется примесями и физическими дефектами решетки (см. рис. 12-1). Поэтому в качестве криопроводника целесообразно применять хорошо отожженный металл высокой чистоты. Мерой качества криопроводникового материала служит относительное сопротивление R_T , определяемое как отношение удельного сопротивления металла при 20°C (293 К) к удельному сопротивлению при заданной криогенной температуре. У хороших криопроводников значение R_T достигает нескольких тысяч. Применение таких материалов

позволяет значительно уменьшить габариты и массу электротехнических устройств и увеличить в то же время их КПД.

На рис. 12-2 приведена температурная зависимость удельного электрического сопротивления особо чистых алюминия и меди, а также бериллия промышленной чистоты с содержанием примесей около 0,1%. Наилучшим криопроводником для работы при температуре жидкого водорода является алюминий, удельное электрическое сопротивление которого при температуре 20 К является минимальным по сравнению с другими металлами. Кроме того, сумма потерь в криопроводнике и потерь на охлаждение проходит через четкий минимум как раз при 20 К. В качестве криопроводникового материала нашел применение алюминий особой и высокой чистоты марок А999 и А995.

У алюминия марки А999, содержащего всего 0,001% примесей, при охлаждении до 20 К удельное электрическое сопротивление достигает остаточного сопротивления и при последующем снижении температуры практически не изменяется. Согласно нормативу ГОСТ 11069-74 остаточное удельное сопротивление алюминия марки А999 не должно превышать $4 \cdot 10^{-6}$ мкОм·м при температуре жидкого гелия. Практически эта характеристика может составить $(1-2) \times 10^{-6}$ мкОм·м. Относительное сопротивление R_T составляет 2400 для проволоки из алюминия особой чистоты при 20,4 К и 1500 для отожженной фольги толщиной 0,1 мм. Предел прочности при растяжении отожженного алюминия А999 при температуре 293 К (20°C) лишь 40 МПа при относительном удлинении порядка 20%, однако при температуре жидкого азота (77,4 К) предел прочности возрастает до 120 МПа при относительном удлинении 46%.

Алюминий марки А995, содержащий 0,005% примесей, позволяет получать токоведущие жилы с относительным сопротивлением R_T в пределах 1000—1500 при криогенных температурах. У алюминия заметно проявляется магниторезистивный эффект: в магнитном поле с ростом индукции до 2 Тл удельное сопротивление резко возрастает, а в более сильных полях наступает насыщение. С увеличением температуры магниторезистивный эффект усиливается, так что при 20 К удельное сопротивление алюминия марки А999 возрастает до $(5-6) \times 10^{-5}$ мкОм·м от значения порядка 10^{-6} мкОм·м при увеличении магнитной индукции от 0 до 2 Тл.

У отожженной проводниковой меди с содержанием примесей около 0,03% (марки М06) относительное сопротивление R_T может доходить при температуре жидкого водорода до 190—200, а у особо чистой (99,999%) меди — до 1430.

Для применения в качестве криопроводника при температуре жидкого азота (намного более дешевого хладагента, чем жидкий водород, неон и тем более гелий) значительный интерес представляет берил-

лий. Бериллий промышленной чистоты с содержанием примесей 0,05% и более при 70—80 К обладает примерно в 10 раз более низким удельным электрическим сопротивлением по сравнению со сверхчистыми алюминием и медью. Кроме того, приведенные потери для бериллия проходят через заметный минимум при 60—80 К. При 77,4 К удельное сопротивление бериллия чистотой 99,94% составляет $2 \cdot 10^{-4}$ мкОм·м (при 293 К около $3 \cdot 10^{-2}$ мкОм·м). Бериллий примерно на 30% легче алюминия, но прочнее его. Проволока диаметром 0,5 мм имеет предел прочности при растяжении 700—1000 МПа при относительном удлинении 1—3%. Однако бериллий в изделиях хрупок, отличается плохой технологичностью, дорог, резко увеличивает свое удельное электрическое сопротивление в магнитном поле, причем возрастание продолжается даже в полях с индукцией выше 4 Тл. Кроме того, бериллий токсичен, особенно в пылевидном состоянии. В результате этих недостатков пока ограничивается применение бериллия в качестве криопроводникового материала.

12-10. КОНТАКТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕКТРОШЕТКИ

Электрическим контактом называют поверхность соприкосновения токоведущих элементов электротехнических устройств, обладающую высокой проводимостью, а также конструктивное приспособление, обеспечивающее такое соприкосновение. По условиям работы контакты разделяются на неподвижные, разрывные и скользящие.

Неподвижные контакты могут быть зажимными (болтовые, винтовые соединения, зажимы) и цельнометаллическими (сварные или паяные соединения). Цельнометаллические соединения не только механически прочны, но и обеспечивают стабильный электрический контакт с малым переходным сопротивлением. В зажимных контактах поверхность соприкосновения определяется контактным давлением и способностью материала к пластической деформации. Чем меньше удельное электрическое сопротивление материала, чем он мягче и чем выше его коррозионная стойкость, тем меньше переходное сопротивление контакта. Поэтому весьма целесообразно покрытие контактных поверхностей мягкими коррозионно-стойкими металлами (оловом, серебром, кадмием и др.), а также зачистка их шлифовальной шкуркой. Контакты из меди и ее сплавов чаще всего покрываются оловом. Контакты для высокочастотной техники целесообразно серебрить. Удовлетворительных способов покрытия алюминия защитным металлом пока не разработано. Так как алюминий быстро покрывается на воздухе пленкой окиси с высоким сопротивлением, контактную поверхность рекомендуется зачищать под слоем вазелина. Сталь весьма склонна к коррозии, и по-

этому контактные соединения защищаются кадмием, цинком или никелем.

Разрывные контакты служат для периодического замыкания и размыкания электрической цепи. К скользящим относятся подвижные контакты, в которых контактирующие части скользят друг по другу без отрыва. Эти виды контактов являются весьма ответственными и интенсивно нагруженными элементами электрических цепей. К материалам для таких контактов предъявляется комплекс строгих требований: устойчивость против коррозии, могущей вызвать образование на контактной поверхности непроводящей пленки и частичное или полное нарушение проводимости; стойкость против электрической эрозии — износа контактов вследствие плавления, испарения, распыления и переноса металла с одного контакта на другой, обусловленного электрическими разрядами и перегревом контактных точек; стойкость к свариванию; механическая прочность — стойкость к действию сжимающих и ударных нагрузок, а также износостойкость при трении; высокие проводимость и теплофизические свойства; технологичность и способность прирабатываться друг к другу.

Слаботочные разрывные контакты изготавливаются из благородных и тугоплавких металлов (платиноидов, золота, серебра, вольфрама и молибдена) и сплавов на их основе типа твердых растворов. Свойства некоторых материалов для слаботочных контактов приведены в табл. 12-35. Металлы платиновой группы (платина, палладий, родий, иридий, рутений, осмий) и сплавы на их основе — лучшие материалы. Платиновые контакты не окисляются и не образуют сернистых пленок, что обеспечивает стабильность переходного сопротивления. У платины минимальный ток дугообразования наибольший (0,9 А) по сравнению с другими благородными металлами (0,35—0,45 А). Напряжение загорания дуги у платины также выше, чем у других металлов. Из-за малой твердости платина в чистом виде редко применяется для контактов. Распространены сплавы платины с иридием, у которых минимальный ток дугообразования и стойкость к электрической эрозии выше, чем у платины. Платино-рутениевые сплавы более прочны и тверды, чем платино-иридиевые, и менее склонны к свариванию контактов по сравнению с платиной. Стойкостью к иглообразованию и к свариванию контактов обладают сплавы платины с никелем. Твердостью и прочностью по сравнению с платиной, а также малой летучестью при высоких температурах характеризуются сплавы платины с родием. Легирование платины вольфрамом и молибденом повышает температуру плавления и твердость материала.

По совокупности свойств палладий как контактный материал уступает платине, но вследствие меньшей стоимости палладий и его сплавы нашли широкое применение. Хорошими свойствами обладают контакты из

Таблица 12-35

Свойства металлов и сплавов для слаботочных контактов

Марка	Химический состав, %	Плотность, кг./м. ³	Температура плавления, °С	Число Бринелля	Удельное сопроти- вление, мкОм·м	Удельная тепло- проводность, Вт/(м·°С)	ГОСТ или ТУ
Пл99,9—99,7	Платина 99,7—99,9	21 450	1773	40	0,105	71	ГОСТ 13198-77
Пд99,8—99,7	Палладий 99,7—99,8	12 160	1554	32	0,108	71	ГОСТ 13462-68
Рд99,9—99,8	Родий 99,8—99,9	12 400	1966	55	0,045	88	ГОСТ 13098-67
Зл99,9—99,9	Золото 99,9—99,99	19 300	1063	20	0,022	311	ГОСТ 6835-72
Ср99,9—99,9	Серебро 99,9—99,99	10 500	961	25	0,016	408	ГОСТ 6836-72
ПлИ-10	Платина — иридий 90/10	21 540	1795	126	0,250	31	ГОСТ 13198-77
ПлИ-25	Платина — иридий 75/25	21 680	1875	246	0,330	16	То же
ПлРу-10	Платина — рутений 90/10	19 950	1780	190	0,430	—	» »
ПлН-4,5	Платина — никель 95,5/4,5	20 170	1700	135	0,253	—	» »
ПлРд-10	Платина — родий 90/10	20 000	1840	90	0,192	—	» »
—	Платина — вольфрам 95/5	21 280	1850	103	0,420	—	—
—	Платина — молибден 90/10	20 500	1800	195	0,585	—	—
ПдИ-10	Палладий — иридий 90/10	12 740	1565	125	0,260	—	ГОСТ 13462-68
ПдИ-18	Палладий — иридий 82/18	13 250	1580	195	0,360	—	То же
П,Ср-20	Палладий — серебро 80/20	11 790	1425	56	0,300	—	» »
ПдСр-40	Палладий — серебро 60/40	11 440	1330	52	0,420	31	» »
ЗлСр750-250	Золото — серебро 75/25	17 000	1044	26	0,059	—	ГОСТ 6835-72
ЗлПл-7	Золото — платина 93/7	19 440	1060	40	0,102	70	То же
ЗлН5	Золото — никель 95/5	18 240	990	100	0,123	—	ЦМТУ 07-220-69
—	Золото — серебро — платина 69/25/6	16 100	1030	112	0,149	55	—
ЗлСрМ580-300	Золото — серебро — медь 58/30/12	13 920	835	125	0,108	—	ГОСТ 6835-72
—	Золото — серебро — никель 70/25/5	15 400	1050	80	0,118	—	—
—	Золото — палладий — никель 65/30/5	16 500	1410	120	0,230	—	—
СрМ960	Серебро — медь 96/4	10 530	880	43	0,018	380	ГОСТ 6836-72
СрМ925	Серебро — медь 92,5/7,5	10 320	800	57	0,019	350	То же
СрМ900	Серебро — медь 90/10	10 240	779	64	0,019	345	» »
СрМ750	Серебро — медь 75/25	10 060	779	82	0,020	325	» »
СрПл-12	Серебро — платина 88/12	11 230	970	115	0,120	—	» »
СрПд-20	Серебро — палладий 80/20	10 790	1070	35	0,102	92	» »
СрКд86-14	Серебро — кадмий 86/14	10 200	895	52	0,029	—	ЦМТУ 07-211-69
ВРН	Вольфрам 99,85	19 300	3410	250	0,055	168	ЦМТУ 037-26-68
МЧ	Молибден 99,958	10 200	2620	150	0,052	146	ТУ 48-42-66-71
—	Вольфрам — молибден 95/5	—	3180	280	0,065	—	—

сплавов палладия с иридием. Хотя они и менее тугоплавки, но значительно дешевле платино-иридиевых сплавов. Сплавы палладия с серебром не образуют сернистых пленок при содержании более 50% палладия.

Золото, серебро и их сплавы более склонны к дугообразованию, чем платина. Золото — это самый мягкий благородный металл. В чистом виде применяется для прецизионных контактов, работающих при малом нажатии и низком напряжении, так как вследствие неокисляемости поверхности золотые контакты подвержены электрической эрозии. Легирование повышает твердость и стойкость золота к эрозии. Распространены контактные сплавы золота с серебром, содержащие более 50% золота и не образующие сернистых пленок. Применяются также сплавы золото — платина и золото — никель. Из тройных сплавов золота наиболее известен его твердый нетуснущий контактный сплав с серебром и платиной. Нашли также применение сплавы золото — серебро — медь и золото — серебро — никель с повышенной твердостью за счет присадки меди и никеля, а также твердый тугоплавкий сплав золото — палладий — никель.

Достоинствами серебра как контактного материала являются высокие значения

удельной электрической проводимости и теплопроводности, что обеспечивает наименьший нагрев контактов. Серебро — практически благородный металл. Его окислы электропроводны, а при нагревании они разлагаются, и поэтому контактное сопротивление остается малым. Недостатками серебра являются его невысокая прочность и твердость в отожженном состоянии, а также склонность к образованию непроводящей пленки сульфида серебра в результате взаимодействия с атмосферным сероводородом в присутствии влаги. Кроме того, сравнительно низкая температура плавления серебра способствует свариванию контактов. Присадка к серебру меди повышает твердость и стойкость к электрической эрозии при малом снижении проводимости. Для работы контактов в условиях образования дуги, а также при малых нажатиях богаты медью сплавы непригодны из-за неустойчивости переходного сопротивления вследствие окисления. Нашли применение сплавы систем серебро — платина, серебро — кадмий и серебро — палладий. Некоторые из них для повышения износостойкости легированы никелем и железом.

Драгоценные металлы (кроме серебра) применяются обычно для контактов в виде тонких гальванических покрытий, нанесен-

Таблица 12-36

Состав и свойства металлокерамических контактов

Марка контакта	Компоненты и их содержание, %	Плотность, кг·м ⁻³	Число Бринелля	Удельное сопротивление, мкОм·м, не более	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°C)	ГОСТ или ТУ
КМК-A10	Серебро — окись кадмия, 85/15	9700	75	0,030	325	ГОСТ 19725-74
КМК-A10м	То же с мелкодисперсной структурой	9900	105	0,028	325	То же
КМК-A20	Серебро — окись меди, 90/10	9500	60	0,025	350	» »
КМК-A20м	То же с мелкодисперсной структурой	9600	75	0,024	350	» »
КМК-A30	Серебро — никель 70/30	9600	75	0,030	355	» »
КМК-A30м	То же с мелкодисперсной структурой	9700	105	0,029	360	» »
КМК-A31	Серебро — никель 60/40	9500	80	0,035	310	» »
КМК-A31м	То же с мелкодисперсной структурой	9600	115	0,035	310	» »
КМК-A41	Серебро — графит 97/3	9300	50	0,026	—	ТУ 16-538-183-73
КМК-A40	Серебро — графит 95/5	8700	40	0,030	420	ГОСТ 19725-74
КМК-A32	Серебро — никель — графит 68/29/3	8900	65	0,035	355	То же
КМК-A33мд	Серебро — никель — графит 68/29/2	9500	95	0,035	—	ТУ 16-538-183-73
КМК-A60	Серебро — вольфрам — никель 48/50/2	13 500	160	0,041	275	ГОСТ 13333-75
КМК-A61	Серебро — вольфрам — никель 27/70/3	15 000	210	0,045	230	То же
КМК-B10	Медь — графит 97/3	7 300	35	0,040	380	ТУ 16-538-272-75
КМК-B20	Медь — вольфрам — никель 48/50/2	12 100	150	0,060	190	ГОСТ 13333-75
КМК-B21	Медь — вольфрам — никель 27/70/3	13 800	200	0,070	135	То же

ных на детали из меди, латуни, бронзы и других сплавов. Осажденные слои металлов более стойки к электрической эрозии и намного тверже соответствующих массивных материалов. Особо велика твердость у электроосажденного родия (число Бринелля до 700) и платины (до 500), но и у палладия она доходит до 250, у серебра — до 100 и у золота — до 70. Осажденные слои применяются в режиме работы без дуги.

Достоинствами вольфрамовых контактов являются стойкость к появлению дуговых разрядов (минимальный ток дугообразования у вольфрама наибольший), стойкость вследствие тугоплавкости против электрической эрозии сваривания, малый механический износ из-за высокой твердости материала. Это позволяет эксплуатировать контакты при больших нажатиях, необходимых ввиду окисляемости вольфрама для обеспечения малого переходного сопротивления. Молибден уступает вольфраму в твердости и тугоплавкости и тоже подвержен атмосферной коррозии. Но молибден образует рыхлые окислы, способные нарушить электропроводность контакта, поэтому при работе на воздухе молибденовые контакты менее надежны. Для работы в вакууме и в инертных газах применяются контакты из сплава вольфрам—молибден повышенной твердости.

Сильноточные (мощные) разрывные контакты изготавливаются главным образом из металлокерамических композиций (псев-

досплавов), получаемых методами порошковой металлургии. Композиции изготавливают на основе серебра и меди: серебро—окись кадмия, серебро—окись меди, серебро—никель, серебро—графит, серебро—никель—графит, серебро—вольфрам—никель, медь—графит, медь—вольфрам—никель. Серебряная или медная фазы обуславливают высокую электро- и теплопроводность контакта, а включения или скелет тугоплавкой фазы повышают стойкость к механическому износу, электрической эрозии, свариванию. Композиции получают либо способом твердофазного спекания спрессованных из порошков заготовок, либо путем пропитки серебром или медью предварительно отпрессованных пористых каркасов из вольфрама или вольфрамоникелевого сплава.

Марки металлокерамических контактов, их состав и свойства приведены в табл. 12-36. Некоторые композиции, изготовленные из особо тонко измельченных порошков, имеют мелкодисперсную структуру. Контакты этого типа, имеющие в конце характеризующей их марки букву «м», более тверды и служат в 1,5—3 раза дольше.

Композиция серебро—окись кадмия широко применяется для контактов в низковольтном аппаратостроении. Рецепт контактных композиций соответствует максимальной электрической износостойкости. Композиция отличается высокой проводимостью и теплопроводностью и низким устойчивым контактным сопротивлением. Контакты из серебра

и окиси кадмия надежны в работе при повышенных токовых нагрузках и небольших контактных нажатиях (1,5—10 Н), так как на их поверхности не образуются непроводящие окисные пленки, требующие для их разрушения высоких контактных давлений. Они стойки к привариванию и обладают повышенной дугостойкостью, хотя и уступают композициям, содержащим вольфрам. Преимущественное распространение имеют контакты марки КМК-А10м с мелкодисперсной структурой, у которых по сравнению с контактами КМК-А10 твердость выше в 1,5 раза, а предел прочности при растяжении — почти в 2 раза (330 и 170 МПа соответственно).

Контакты из композиции серебро—окись меди характеризуются высокой стойкостью к электрическому износу и привариванию, обладают низким и устойчивым переходным сопротивлением, при высоких токовых нагрузках не уступают контактам из композиции серебро—окись кадмия. Контакты с мелкодисперсной структурой марки КМК-А20м имеют износостойкость в 1,5—2 раза выше, чем марки КМК-А20.

Контакты из композиции серебро—никель широко используются в аппаратах постоянного и переменного тока низкого напряжения с умеренными нагрузками. Эти контакты обладают низким стабильным переходным сопротивлением, по сопротивлению привариванию и дугостойкости превосходят серебряные, однако уступают в этом контактам из композиций серебро—окись кадмия и серебро—окись меди. Однако контакты двух последних типов для облегчения пайки и сварки выпускаются с серебряным подслоем, а композиции серебро—никель легко паяется и сваривается без такого подслоя. В отечественной практике применяются контакты с повышенным содержанием никеля (30 и 40%), отличающиеся более благоприятными механическими свойствами.

Контакты из композиции серебро—графит весьма стойки к свариванию и к механическому износу, обладают низким контактным сопротивлением, но отличаются повышенным износом при действии дуги и ограниченной механической прочностью и твердостью. Введение графита затрудняет образование электрической дуги (графит отличается высоким напряжением зажигания дуги, составляющим 20 В). Контакты из композиции серебро—никель—графит по сравнению с изготовленными из композиции серебро—никель отличаются повышенной стойкостью к свариванию и затрудненным дугообразованием, но электрическая износостойкость их ниже. Эти контакты применяют в низковольтных аппаратах со значительными токовыми нагрузками и перегрузками (автоматические выключатели). Износостойкость контакта повышается, если сереброникелевую матрицу выполнять с мелкодисперсной структурой (марка КМК-А33мд). Контакт серебро—никель—графит, как и контакт серебро—графит, применяется в паре с контактом серебро—

никель, так как такие комбинированные контактные пары обнаруживают повышенную износостойкость.

Контакты из композиции серебро—вольфрам—никель отличаются высокой стойкостью к оплавлению, свариванию и износу при больших токовых нагрузках, эффективно работают как дуговые контакты в воздушных высоко- и низковольтных выключающих устройствах. Окисление вольфрама способствует повышению переходного сопротивления и не обеспечивает стабильной работы при малых контактных нажатиях. Присадка 2—3% растворяющегося в вольфраме никеля повышает прочность композиции. Контакты имеют подслои из серебра.

Композиция медь—графит применяется для стойких к свариванию контактов, способных отключать токи 30—100 кА. Для этого контакты изготавливают с 10—15% пор, с относительно невысокой твердостью и прочностью на разрыв, что гарантирует их размыкание при сваривании. Контакты рассчитаны на небольшое число срабатываний. Контакты марки КМК-В10, содержащие 3% графита, выпускаются с медным подслоем без промежуточного слоя. Контакты марки КМК-В11 трехслойные: между верхним, рабочим слоем с 5% графита и медным подслоем находится промежуточный слой с 3% графита. Промежуточный слой уменьшает коробление контакта, возникающее при спекании верхнего слоя и медного подслоя вследствие большой разницы в усадке.

Контакты из композиции медь—вольфрам отличаются от серебряно-вольфрамовых более высокой износостойкостью, сопротивлением свариванию и оплавлению при больших токах и напряжениях, а также повышенными механическими характеристиками. Вследствие окисления композиция медь—вольфрам применяется для контактов, работающих в масле при высоких контактных нажатиях (дуговые контакты высоковольтных масляных выключателей). Для повышения прочности в композицию вводится 2—3% никеля. Контакты выпускаются с медным подслоем. Для особо мощных выключателей изготавливаются контакты с повышенными дугостойкостью, проводимостью и теплопроводностью, состоящие из трех и более слоев с изменяющимся содержанием вольфрама от максимального в верхнем (рабочем) слое до нулевого в крепежной части.

Медь как контактный материал обладает многими достоинствами: дешев, высокие проводимость и теплопроводность, достаточно высокая механическая прочность. Основной недостаток — склонность к атмосферной коррозии с образованием окисных и сульфидных пленок с высоким сопротивлением, способных вывести контакт из строя. По этой причине медь непригодна для слаботоковых контактов, однако с успехом применяется в силовых аппаратах (контакторах, контроллерах), работающих при напряжениях, способных пробить окисную пленку (выше 100 В), и там, где контакты

действуют при заметных контактных нажатиях (не менее 3 Н) и с проскальзыванием, способным разрушить эту пленку. Медь может применяться и для дугогасительных контактов. Под действием дуги окисная пленка разлагается. Однако механическое отслаивание и термическое разложение окисной пленки вызывают значительный износ высокопрочных медных контактов. Сплав меди с 1% кадмия в 3 раза устойчивее меди к истиранию и в 2 раза более износостоек как контактный материал в тяжело нагруженных контакторах и контроллерах тягового и кранового электрооборудования. Профили для контактов из меди марки М1 (ГОСТ 859-78) поставляются промышленностью в соответствии с ТУ 48-08-314-70 и ТУ 48-08-320-70. Прутки профильные из сплава меди с кадмием (0,9—1,2% кадмия) для изготовления контактов силовых электрических аппаратов изготавливаются в соответствии с ТУ 48-08-500-71. В соответствии с ТУ 48-08-395-71 поставляются профили из хромовой бронзы марки БрХ (0,4—0,7% хрома) для контактов аппаратуры.

Металлокерамические контакты изготавливаются круглой, прямоугольной (с плоской и сферической поверхностью) и сложной формы. Форма и размеры металлокерамических контактов на основе вольфрама (получаются методом жидкофазного спекания) определяются ГОСТ 13333-75, а контактов, полученных методом твердофазного спекания, — ГОСТ 3884-77.

Скользящие контакты работают примерно в таких же условиях, что и разрывные, однако специфическим требованием к материалам для них является повышенная стойкость к механическому износу при трении. Скользящие контакты применяются в устройствах токосъема электротранспорта, электрических машинах (между щетками и коллектором или контактными кольцами), в реостатах, ползунковых переключателях и других конструкциях. Значительный износ возникает при сухом трении, если оба контакта изготовлены из одного материала, а также при неудачном выборе пар (например, трение латуни по стали). Высокими качествами обладают контактные пары, составленные из металлического и графитосодержащего материалов. Такой скользящий контакт отличается малым износом от трения. Графит имеет наибольшее напряжение дугообразования по сравнению с металлами и сплавами, и износ контакта от искрения поэтому невелик. На поверхности графита отсутствуют окисные пленки, и контакт имеет прямолинейную вольт-амперную характеристику.

Сортамент и свойства медных и бронзовых контактных проводов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в § 12-15.

Для изготовления скользящих контактов широкое применение нашли бронзы и латуни, отличающиеся высокой механической прочностью, упругостью и износостойкостью, антифрикционными свойствами, стой-

костью к атмосферной коррозии: латуни марок Л63, ЛС59-1, ЛМц58-2, ЛЖМц59-1-1, бронзы марок БрКд1, БрБ2, БрОФ6, 5-0,12 и др. Их свойства приведены в § 12-3 и 12-4.

Сортамент и свойства профилей для коллекторов электрических машин, изготовленных из меди и меди, легированной серебром, приведены в § 12-16. Для рабочих температур до 130°C широко применяются коллекторные пластины из меди. При нормальной работе на коллекторе образуется блестящая пленка, состоящая главным образом из окиси и гидроокиси меди и называемая политурой. Политура увеличивает переходное сопротивление щеточного контакта и тем самым ухудшает коммутацию, а также резко снижает механический износ щеток. При разрушении политуры под действием электрических разрядов или в результате уменьшения содержания влаги в верхних слоях атмосферы (на высотных самолетах) условия коммутации ухудшаются, поверхность коллектора становится шероховатой, износ щеток катастрофически растет. Для работы в высотных условиях созданы специальные типы щеток. Для ответственных быстроходных машин с рабочей температурой до 155°C целесообразно применять коллекторные пластины и контактные кольца из меди, легированной серебром.

Из сплава меди с кадмием (БрКд1, содержание кадмия 0,9—1,2%) в соответствии с ГОСТ 4134-75 выпускается кадмиевая медь для коллекторных пластин с твердостью по Бринеллю не менее 93, а в соответствии с ТУ 48-21-5038-72 — коллекторный профиль (число Бринелля не менее 105). Согласно ЦМТУ 08-38-67 изготавливаются полосы коллекторные из магниевой бронзы (БрМг0,2, магния от 0,1 до 0,35%) с числом Бринелля не менее 90. Эти профили применяются для быстроходных машин с рабочими температурами до 130 и 230°C соответственно. Для высокотемпературных скоростных машин выпускаются полосы коллекторные из хромовой бронзы (БрХ0,7 с содержанием хрома 0,4—1%) с твердостью по Бринеллю не менее 100 (ТУ 48-21-154-72) и из циркониевой бронзы (БрЦр0,4 с содержанием циркония от 0,3 до 0,5%) с числом Бринелля не менее 115 (ТУ 48-21-222-72).

Для изготовления контактных колец электрических машин с плотностью тока под щетками до 15—20 А/см² целесообразно применять стойкую к коррозии хромоникелевую нержавеющую сталь (Х18Н9Т) и прочный, стойкий к вибрации и обладающий антифрикционными свойствами серый чугун (СЧ18-36).

Щетки для электрических машин (электрощетки) являются неподвижной частью скользящего контакта для подвода и отвода тока на коллекторах и контактных кольцах. Качество щеток оценивается следующими характеристиками: твердостью, удельным электрическим сопротивлением, переходным падением напряжения на пару щеток, износостойкостью, коэффициентом

Таблица 12-37

Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего применения по ГОСТ 2332-75

Обозначение марок щеток	Наименование групп марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность тока, А/см ²	Окружная скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
Г20 Г21 Г22	Угльно-графитные	2,9 4,3 2,5	15 5 10	40 30 30	50 15—100 40	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г3 611М 6110М	Графитные	1,9 2,0 2,0	11 12 15	25 40 90	20—25 20—25 12—22	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2А ЭГ2АФ ЭГ4 ЭГ8 ЭГ14 ЭГ51 ЭГ61 ЭГ71 ЭГ74 ЭГ74АФ ЭГ85	Электрографитированные	2,6 2,2 2,0 2,4 2,5 2,2 3,0 2,2 2,7 2,3 2,3	10 15 12 10 11 12 13 12 15 15 15	45 90 40 40 40 60 60 40 50 60 50	20—25 15—21 15—20 20—40 20—40 20—25 35—50 20—25 17,5—25 15—21 17,5—35	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
М1 М3 М6 М20 МГ МГ2 МГ4 МГ64 МГСО МГС5	Металлографитные	1,5 1,8 1,5 1,4 0,2 0,5 1,1 0,5 0,2 2,0	15 12 15 12 20 20 15 25 20 15	25 20 25 20 20 20 25 25 20 35	15—20 15—20 15—20 15—20 18—23 18—23 20—25 15—20 18—23 20—25	Низковольтные генераторы и контактные кольца

Примечания: 1. При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших частот вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа.

2. Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

3. Коэффициент трения щеток принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

Таблица 12-38

Продолжение табл. 12-38

Физико-механические и коллекторные характеристики электрощеток (ГОСТ 2332-75)

Обозначение марок щеток	Твердость, 10 ⁴ кПа	Удельное электрическое сопротивление, мКОМ·м	Износ на короткозамкнутом коллекторе, мм, не более	Коэффициент трения, не более	Обозначение марок щеток	Твердость, 10 ⁴ кПа	Удельное электрическое сопротивление, мКОМ·м	Износ на короткозамкнутом коллекторе, мм, не более	Коэффициент трения, не более
Г20	—	35—100	0,15	0,22	ЭГ14	7,8—29,4	20—38	0,40	0,25
Г21	19,6—59,0	150—420	—	0,22	ЭГ51	16,6—53,9	20—40	0,40	0,22
Г22	16,7—53,9	100—230	0,30	0,25	ЭГ61	—	24—46	0,40	0,17
Г3	6,9—18,6	8—20	0,50	0,30	ЭГ71	5,9—13,7	20—35	0,40	0,30
611М	4,9—11,7	8—22	0,40	0,30	ЭГ74	14,7—49,0	35—75	0,40	0,22
6110М	4,9—11,7	8—28	0,40	0,30	ЭГ74АФ	19,6—49,0	19—38	0,40	0,22
ЭГ2А	6,9—21,6	11—28	0,40	0,23	ЭГ85	16,7—49,0	35—75	0,40	0,22
ЭГ2АФ	4,9—21,6	12—35	0,40	0,23	М1	7,8—24,6	2—5	0,18	0,25
ЭГ4	1,9—6,9	6—16	0,60	0,25	М3	6,9—17,6	6—12	0,15	0,25
ЭГ8	7,8—34,3	30—45	0,40	0,25	М6	9,8—24,6	1—6	0,35	0,20
					М20	7,8—24,6	3—13	0,20	0,26
					МГ	3,9—13,7	0,04—0,12	0,80	0,20

Продолжение табл. 12-38

Обозначение марок щеток	Твердость, 10 ⁴ кПа	Удельное электрическое сопротивление, мКОм·м	Износ на короткозамкнутом коллекторе, мм, не более	Коэффициент трения, не более
МГ2	3,9—17,6	0,10—0,25	0,40	0,20
МГ4	9,8—21,6	0,30—1,30	0,30	0,20
МГ64	4,9—17,6	0,05—0,25	0,60	0,20
МГС5	2—14,7	2—15	0,40	0,22
МГСО	5,9—19,6	Не более 0,30	0,60	0,25

Примечания: 1. Предел прочности при сжатии щеток марки Г20 не менее 9,8 МПа.
2. Износ щеток определяется за время 20—50 ч.

трения, допустимой плотностью тока, допустимой окружной скоростью коллектора или контактного кольца, давлением на щетку при работе. В соответствии с ГОСТ 2332-75 для электрических машин общего применения выпускаются 27 марок щеток, разделяющихся на четыре группы. Рекомендуемые этим стандартом расчетные параметры и условия работы щеток приведены в табл. 12-37. Физико-механические и коллекторные характеристики щеток всех марок должны соответствовать указанным в табл. 12-38 данным.

Угольно-графитные щетки изготовляют прессованием из графита с введением дру-

гих углеродистых материалов (кокса, сажи) и связующих веществ (смолы, пеков) с последующим обжигом при температуре порядка 1400°C. Они отличаются высокой твердостью и высоким удельным сопротивлением.

Графитные щетки изготавливают из натурального графита без связующих (мягкие сорта) и с применением связующего (твердые сорта). Мягкие щетки после прессования не спекаются. Эти щетки отличаются мягкостью и при работе создают незначительный шум.

Электрографитированные щетки изготовляют из порошков графита и других углеродистых материалов (кокса, сажи) с введением связующих высокотемпературным обжигом при 2500°C. При этом удаляются примеси и происходит графитизация — образование электротехнического поликристаллического плотного графита с увеличенным размером кристаллов. Эти щетки обла-

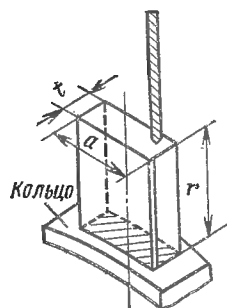


Рис. 12-3. Расположение щетки на контактном кольце электрической машины.

Т а б л и ц а 12-39

Основные размеры электродов по ГОСТ 12232.1-77, мм

Толщина <i>t</i>	Длина <i>a</i>	Высота <i>r</i>	Толщина <i>t</i>	Длина <i>a</i>	Высота <i>r</i>	Толщина <i>t</i>	Длина <i>a</i>	Высота <i>r</i>	Толщина <i>t</i>	Длина <i>a</i>	Высота <i>r</i>
1,6	2 2,5	8 8	5	6,3 8 10 12,5	12,5; 16 16; 20; 25 16; 20; 25 20; 25; 32 20; 25; 32 25; 32 32; 40	10	12,5 16 20 25	25; 32 25; 32 25; 32; 40 32; 40; 50	16	20 25 32 40 50	32; 40; 50 32; 40; 50 32; 40; 50 40; 50; 64 50; 64
2	2,5 3,2	8 8									
2,5	3,2 4 5	8; 10 8; 10 10; 12,5	6,3	8 10 12,5 16 20 25 32	20; 25 20; 25; 32 20; 25; 32 25; 32 25; 32 32; 40 32; 40		32 40	32; 40; 50 40; 50	20	25 32 40 50	32; 40; 50 32; 40; 50 40; 50; 64 50; 64
3,2	4 5 6,3	8; 10; 12,5 10; 12,5 12,5; 16				12,5	16 20 25 32	25; 32 32; 40 32; 40; 50 32; 40; 50	25	32 40 50	40; 50; 64 40; 50; 64 50; 64
4	5 6,3 8 10	10; 12,5 12,5; 16 16; 20 16; 20	8	10 12,5 16 20 25 32	20; 25; 32 25; 32 25; 32 25; 32 32; 40; 50 32; 40; 50		32 40 50	32; 40; 50 40; 50; 64 50; 64	32	40 50	40; 50; 64 50; 64; 80
									40	50	80; 100

дают высокой механической прочностью и стойкостью к толчкообразному изменению нагрузки (тяговые электродвигатели). В зависимости от рецептуры и режима обработки могут иметь различную твердость. Обеспечивают хорошую коммутацию в быстроходных машинах.

Металлографитные щетки изготавливают из смеси порошков графита и меди с добавлением в необходимых случаях порошков свинца, олова и серебра. Эти щетки отличаются особо низким удельным сопротивлением, малым переходным падением напряжения и допускают повышенную плотность тока. Поэтому их целесообразно применять в электрических машинах низкого напряжения, в том числе и рассчитанных на большие токи.

Типы и размеры изготавливаемых электрощеток регламентируются ГОСТ 12232.1-77. Стандартные размеры щеток приведены в табл. 12-39. Обозначение размеров соответствует рис. 12-3, на котором показано расположение щетки на контактном кольце электрической машины. При расположении щетки на коллекторе размер a будет являться осевым размером щетки (вдоль оси вращения машины), а размер t — тангенциальным.

12-11. МЕДНАЯ ПРОВОЛОКА

Медная проволока изготавливается круглой и прямоугольного сечения и предназначена для изготовления проводов, кабелей и других электротехнических целей. Круглая проволока изготавливается мягкой (марка ММ), твердой (марка МТ) и МС — для связи по ГОСТ 2112-71. При производстве круглой проволоки используется медная катанка по ГОСТ 13842-74, которая должна быть изготовлена из медных слитков типов СВ-I, СВ-II, СС-I, СС-II, СН-I и СН-II по ГОСТ 193-67, ГОСТ 5.657-70 или методом непрерывного литья и прокатки из катодной меди. Катанка, полученная таким методом, должна соответствовать марке меди не ниже М1 по ГОСТ 859-78, при этом содержание кислорода в катанке не должно превышать 0,045%. Катанка для изготовления проволоки марки МС по своему химическому составу должна соответствовать меди М06 по ГОСТ 859-78. Медная круглая проволока изготавливается в диапазоне диаметров 0,02—8,50 мм. Предельные отклонения диаметра составляют от $\pm 0,002$ мм для тончайшей проволоки до $\pm 0,040$ мм для проволоки максимальных диаметров.

Удельное электрическое сопротивление проволоки постоянному току при температуре 20°C должно соответствовать значениям, приведенным в табл. 12-40.

Механические свойства круглой медной проволоки марок ММ и МТ должны соответствовать указанным в табл. 12-41.

Медная проволока марки МС должна иметь относительное удлинение не менее 1,5%, а предел прочности при растяжении —

Таблица 12-40

Удельное электрическое сопротивление
круглой медной проволоки

Диаметр проволоки, мм	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м, не более, для марок	
	ММ	МТ, МС
До 1,00	0,01724	0,0180
1,00—2,49		0,0178
2,50 и более		0,0177

в пределах 420—440 МПа (проволока марки ММС выпускается только четырех диаметров — 2,51; 3,00; 3,53 и 4,00 мм). Для круглой медной проволоки марки МТ диаметром от 1,0 до 6,0 мм и марки МС фиксируется минимальное число перегибов, которое составляет в зависимости от диаметра 4—7 для проволоки марки МТ и 8—15 для проволоки марки МС.

Медная проволока прямоугольного сечения марок ПММ (мягкая) и ПМТ (твердая) изготавливается по ГОСТ 434-78. Для изготовления прямоугольной медной проволоки применяются медная катанка по ГОСТ 13842-74 или сортовой подкат, изготовленный по техническим условиям ТУ 16.501.019-74. Если меньшую сторону проволоки обозначить как a (толщина), а большую как b (ширина), то a находится в пределах 0,80—4,00 мм, а b равно 2,00—30,00 мм. В этом случае сечение выпускаемой прямоугольной проволоки колеблется от 1,46 до 149,14 мм².

Сечения прямоугольной медной проволоки рассчитываются с учетом радиусов закругления углов, которые составляют 0,5 a при размере a до 1,00 мм включительно, 0,5 мм при 1,00—1,60 мм, 0,65 мм при 1,60—2,24 мм, 0,8 мм при 2,24—3,55 мм, 1,0 мм при 3,55 мм и более. Предельные отклонения размеров проволоки в зависимости от размеров сторон сечения составляют $\pm 0,02$ — $\pm 0,35$ мм.

Механические свойства прямоугольной проволоки должны соответствовать указанным в табл. 12-42.

Круглая и прямоугольная медная проволока должна храниться в помещении при 5—35°C и относительной влажности воздуха не более 80%.

В стандартах на круглую и прямоугольную медную проволоку содержится два ряда размеров: один, соответствующий сложившейся отечественной практике, и второй, соответствующий рекомендациям Международной электротехнической комиссии (МЭК) и СЭВ. Первый ряд допускается применять, не используя эти размеры проволоки в новых разработках.

На круглую медную проволоку, предназначенную для последующего эмалирования, распространяется ОСТ 16.0.505.008-73, который регламентирует целый ряд повышенных требований к качеству проволоки по

Таблица 12-41

Механические свойства круглой медной проволоки марок ММ и МТ

Диаметр проволоки, мм	Механические свойства проволоки марок					
	ММ		МТ			
	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее	с государственным Знаком качества		I категории качества	
			Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее
0,02 0,03 0,04	200—290	6 10 10	440	—	440	—
0,05 0,06 0,07 0,08 0,09 0,10		10 12 13 14 15 16	420	—	410	—
0,11—0,12 0,13—0,15 0,16—0,19		17 18 19	420	1,2	390	1,0
0,20—0,59		20				
0,60—0,97 1,0—1,95		25 30				
2,0—2,97 3,0—4,80		30 30				
5,0—10,0	{	30 35	330 390	1,6 2,0	370 350	1,5 2,0

Таблица 12-42

Механические свойства проволоки прямоугольного сечения

Размер а, мм	Относительное удлинение, %, не менее, для марки ПММ	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее, для марки ПМТ
≤ 0,80 вкл.	—	310
0,80—1,32	30	310
1,32—3,35	22	270
3,35—7,00	34	260
7,00	35	—

внешнего вида. Круглая медная проволока, предназначенная для последующего эмалирования, должна изготавливаться из скальпированной катанки марок МКСП и МКСС по ГОСТ 13842-68 или из катанки, полученной методом непрерывного литья и прокатки. Проволока в диапазоне диаметров от 0,38 до 1,25 мм может изготавливаться из не скальпированной катанки.

12-12. ПРОВОЛОКА АЛЮМИНИЕВАЯ И ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

сравнению с ГОСТ 2112-71. Прежде всего это касается допусков на диаметр, которые значительно жестче. Так, предельные отклонения размера составляют $\pm 0,002$ мм для проволоки диаметром 0,07—0,10 мм, $+0,004$ мм — 0,003 мм для 0,31—0,55 мм и т. д. В стандарте оговаривается, что овальность проволоки не должна выводить размеры за предельные отклонения по диаметру. Мягкая медная проволока и твердая проволока диаметром 0,375 мм и выше после отжига испытываются навиванием на стержень, диаметр которого равен диаметру испытываемой проволоки, при этом на проволоке не должны появляться такие дефекты, как заусенцы, расслаивание, изменение

Круглая алюминиевая проволока, предназначенная для изготовления проводов и кабелей и других электротехнических целей, в соответствии с ГОСТ 6132-71 изготавливается твердой (марка АТ), полутвердой (марка АПТ), мягкой (марка АМ) и твердой повышенной прочности (марка АТп). Проволока изготавливается из алюминиевой катанки по ГОСТ 13848-75 и выпускается в диапазоне диаметров от 0,08 до 10,0 мм. В зависимости от диаметра проволоки предельные отклонения размеров проволоки колеблются от $\pm 0,004$ до $\pm 0,08$ мм. Для неизолированных сталелюминиевых и алюминиевых, а также обмоточных проводов допускается применение проволоки с размерами, отличающимися от

Таблица 12-43

Механические свойства проволоки марок АТ, АПТ и АМ

Диаметр проволоки, мм	АТ		АПТ		АМ	
	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %
0,08—0,10	100	0,5	—	—	—	—
0,10—0,30	120	0,5				
0,30—0,50	160	0,7	—	—	—	—
0,50—0,60	180	1,0				
0,60—0,70	170	1,0				
0,70—0,80	170	1,0				
0,80—1,00	170	1,0				
1,00—1,50	170	1,0	90—140	2,0	70—100	18 18 20 25
1,50—2,50	170	1,3				
2,50—4,00	165	1,5				
4,00—5,00	160	2,0				
5,00—6,00	150	2,0	3,0	—	—	25 25
6,00—10,00	150	2,0				

Таблица 12-44

Механические свойства проволоки марки АПТ

Диаметр проволоки, мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
	не менее	
1,6—2,29	190	1,5
2,29—2,62	180	1,5
2,62—3,04	180	1,6
3,04—3,37	175	1,7
3,37—3,80	175	1,8
3,80—4,50	170	2,0

Таблица 12-45

Механические характеристики проволоки из алюминиевого сплава

Характеристики	АСТ	АСМ	АСЗ
Предел прочности при разрыве, МПа, не менее	220	150	300
Относительное удлинение, %, не менее	1,5	15,0	4,0

основного ряда размеров алюминиевой проволоки. Удельное электрическое сопротивление мягкой алюминиевой проволоки не должно превышать 0,0280 мкОм·м, твердой повышенной прочности, твердой и полутвердой — 0,0283 мкОм·м. Механические

Таблица 12-46

Механические свойства проволоки

Механические свойства	Сечение проволоки, мм²	Нормы для проволоки марок			
		ПАТ		ПАМ	
		с государственным Знаком качества	I категории	с государственным Знаком качества	I категории
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	<30	130	120	72	70
	>30	125		70	
Относительное удлинение, %, не менее	<30	1,5	1,5	25	20
	>30	2,0	2,0	26	

свойства проволоки марок АТ, АПТ, АМ должны соответствовать указанным в табл. 12-43, а марки АПТ — в табл. 12-44.

Твердая повышенной прочности и твердая алюминиевая проволока выдерживает без разрушения 7—8 перегибов, полутвердая — 14—18. Проволока марок АПТ, АТ и АПТ диаметром менее 1,5 и более 5,1 мм, а также мягкая проволока на перегиб не испытываются.

При хранении проволока должна быть защищена от механических воздействий, солнечных лучей, атмосферных осадков и агрессивных сред, вредно действующих на проволоку и тару. Гарантийный срок хранения проволоки — 6 мес с момента изготовления.

Круглая проволока из алюминиевого сплава марки АВ-Е изготавливается по ТУ 16-501.016-74 и предназначена в основном для неизолированных проводов. Твердая проволока марки АСТ и мягкая марки АСМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,30—4,15 мм. Проволока марки АСЗ, термомеханически обработанная (закалка — волочение — искусственное старение), изготавливается диаметром 1,70—4,15 мм. Электрическое сопротивление постоянному току не должно превышать 0,030 мкОм·м для твердой проволоки, 0,0295 мкОм·м для мягкой и 0,0325 мкОм·м для термомеханически обработанной. Механические характеристики проволоки из алюминиевого сплава приведены в табл. 12-45.

Прямоугольная алюминиевая проволока, предназначенная для изготовления обмоточных проводов и других электротехнических целей, изготавливается по ГОСТ 10687-76. Проволока должна изготавливаться твердой марки ПАТ и мягкой марки

ПАМ. Номинальные размеры проволоки по большей стороне b находятся в пределах от 2,00 до 45,0 мм, по меньшей стороне a — от 0,8 до 12,5 мм. Диапазон сечений выпускаемой прямоугольной алюминиевой проволоки — от 1,46 до 561 мм².

Для изготовления проволоки применяются как алюминиевые слитки по ГОСТ 4004-64, так и алюминиевая катанка по ГОСТ 13843-75 и ГОСТ 5.807-74. Проволока имеет закругленные углы, причем в зависимости от размеров проволоки радиус закругления составляет 0,5—1,0 мм. Механические свойства проволоки должны соответствовать указанным в табл. 12-46.

Удельное электрическое сопротивление проволоки постоянному току должно со-

ставлять не более 0,0280 мкОм·м для мягкой и не более 0,0283 мкОм·м для твердой проволоки. Гарантийный срок хранения проволоки — 6 мес.

12-13. НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА

Неизолированные провода из меди, алюминия, алюминиевых сплавов, стале-алюминиевые изготавливаются в соответствии с ГОСТ 839-79 и предназначены для передачи электрической энергии в воздушных электрических сетях. Общий вид неизолированных проводов для воздушных ЛЭП показан на рис. 12-4. Марки, конструкции и преимущественные области применения неизолированных проводов приведены в табл. 12-47.

Таблица 12-47

Марки, конструкции и преимущественные области применения неизолированных проводов

Марки проводов	Конструкции проводов	Преимущественные области применения
М	Провод, состоящий из одной или нескольких скрученных медных проволок	В атмосфере воздуха типов II и III на суше и в море всех микроклиматических районов по ГОСТ 15150-69
А	Провод, состоящий из скрученных алюминиевых проволок	В атмосфере воздуха типов I и II, но при условии содержания в атмосфере сернистого газа, дающего осадок не более 150 мг/(м ² ×Хсут), на суше всех микроклиматических районов по ГОСТ 15150-69, кроме районов ТВ и ТС
АКП	Провод марки А, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	На побережьях морей, соленых озер, в промышленных районах и в районах засоленных песков, а также в прилегающих к ним районах с атмосферой воздуха типов II и III, на суше и в море всех макроклиматических районов по ГОСТ 15150-69
АС	Провод, состоящий из стального сердечника и алюминиевых проволок	См. марку А
АСКС	Провод марки АС, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением его наружную поверхность, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	На побережьях морей, соленых озер, в промышленных районах и в районах засоленных песков, а также в прилегающих к ним районах с атмосферой воздуха типов II и III, но при условии содержания в атмосфере сернистого газа, дающего осадок не более 150 мг/(м ² ×Хсут) и хлористых солей не более 200 мг/(м ² ×Хсут), на суше всех макроклиматических районов по ГОСТ 15150-69, кроме районов ТВ
АСКП	Провод марки АС, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АКП
АСК	Провод марки АС, но стальной сердечник изолирован двумя лентами полиэтилен-терфталатной пленки. Стальной сердечник под лентами должен быть покрыт нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АСК
АН	Провод, скрученный из проволок из нетермообработанного алюминиевого сплава	См. марку А
АНКП	Провод марки АН, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АКП
АЖ	Провод, состоящий из скрученных проволок из термообработанного алюминиевого сплава	См. марку А
АЖКП	Провод марки АЖ, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АКП

Примечания: 1. Типы атмосфер делятся на I, II и III в зависимости от содержания коррозионно-активных агентов. Атмосфера типа I примерно соответствует атмосфере сельской, лесной, горной местности вдали от промышленных объектов, типа II — атмосфере промышленных районов, типа III — морской.

2. Макроклиматический район ТВ — район с влажным тропическим климатом, ТС — с сухим тропическим климатом (исполнения электротехнических изделий для эксплуатации в этих районах могут быть обозначены термином «тропическое исполнение»).

Таблица 12-48

Основные расчетные характеристики медных неизолированных проводов

Расчетные характеристики проводов марки М						
Номинальное сечение, мм ²	Сечение, мм ²	Диаметр, мм	Сопротивление постоянному току при 20°С, Ом/км, не более	Разрывное усилие провода, Н, не менее		Масса, кг/км
				медной проволоки марки МТ 1-й категории качества	медной проволоки марки МТ со знаком качества	
4	3,94	2,2	4,60092	1520	1630	35
6	5,85	2,7	3,07019	2293	2430	52
10	9,89	3,6	1,81978	3630	3820	88
16	15,90	5,1	1,15730	5600	6020	142
25	24,90	6,4	0,73367	8830	3490	224
35	34,61	7,5	0,52386	12 300	13 220	311
50	49,40	9,0	0,36822	16 620	17 490	444
70	67,70	10,7	0,27238	24 750	26 600	612
95	94,00	12,6	0,19449	34 460	37 000	850
120	117,0	14,0	0,15603	42 960	46 180	1058
150	148,0	15,8	0,12388	50 500	54 100	1338
185	183,0	17,6	0,10015	67 110	72 140	1659
240	234,0	19,9	0,07809	86 070	92 530	2124
300	288,0	22,1	0,06379	100 090	105 360	2614
350	346,0	24,2	0,05309	120 270	126 600	3135
400	389,0	25,5	0,04713	135 490	142 620	3528

Таблица 12-49

Основные расчетные характеристики алюминиевых неизолированных проводов

Номинальное сечение, мм ²	Расчетные характеристики проводов марок А, АКП						Масса, кг/км (без смазки)	Масса смазки для марки АКП, кг
	Сечение, мм ²	Диаметр, мм	Сопротивление постоянному току при 20°С, Ом/км, не более	Разрывное усилие провода, Н, не менее				
				из алюминиевой проволоки марки АТ	из алюминиевой проволоки марки АТП			
16	15,9	5,1	1,83763	—	—	2670	43	—
25	24,9	6,4	1,16496	—	—	4040	68	—
35	34,3	7,5	0,85013	—	—	7620	94	—
50	49,5	9,0	0,58798	7060	7620	135	—	—
70	69,2	10,7	0,42098	9110	10 460	189	—	—
95	92,4	12,3	0,31465	10 140	13 500	252	—	—
120	117,0	14,0	0,25095	—	19 190	321	16	—
150	148,0	15,8	0,19780	22 320	23 670	403	20	—
185	183,0	17,5	0,16085	27 450	29 110	502	25	—
240	239,0	20,0	0,12279	35 950	37 040	655	33	—
300	288,0	22,1	0,10186	43 460	46 100	794	54	—
350	346,0	24,2	0,08478	52 220	55 390	952	65	—
400	389,0	25,6	0,07567	58 510	62 050	1072	73	—
450	442,0	27,3	0,06655	66 980	69 000	1217	83	—
500	500,0	29,1	0,05870	73 130	77 700	1378	94	—
550	544,0	30,3	0,05400	77 790	82 490	1500	117	—
600	587,0	31,5	0,05032	83 480	88 540	1618	126	—
650	641,0	32,9	0,04597	91 380	96 920	1769	138	—
700	691,0	34,2	0,04261	98 590	104 560	1907	149	—
750	747,0	35,6	0,03935	105 610	109 840	2051	161	—
800	805,0	36,9	0,03654	111 460	118 430	2220	173	—

Таблица 12-50

Основные расчетные характеристики неизолированных проводов из алюминиевого сплава

Номи- нальное сечение, мм ²	Расчетные характеристики проводов марок АН, АЖ, АНКП, АЖКП							
	Сечение, мм ²	Диаметр, мм	Сопротивление посто- янному току при 20°С, Ом/км, не более		Разрывное усилие провода, Н, не менее		Масса, кг/км (без смазки)	Масса смаз- ки для мар- ок АНКП, АЖКП, кг/км
			АН	АЖ	АН	АЖ		
16	15,9	5,1	1,95055	2,11304	3290	4310	43	—
25	24,9	6,4	1,23652	1,33956	4750	6480	68	—
35	34,3	7,5	0,90234	0,97754	6510	8800	94	—
50	49,5	9,0	0,62410	0,67610	9410	12 830	135	—
120	117,0	14,0	0,26637	0,28857	23 460	31 990	321	16
150	148,0	15,8	0,21131	0,22892	29 570	40 320	406	20
185	183,0	17,5	0,17072	0,18495	36 600	49 900	502	25

Таблица 12-51

Основные расчетные характеристики неизолированных сталалюминевых проводов

Номинальное сечение, мм², алюминий/сталь	Расчетные характеристики проводов марки АС, АСКС, АСКП, АСК										
	Сечение, мм²		Диаметр, мм		Сопротивление по- стоянному току при 20°С, Ом/км, не бо- лее	Разрывное уси- лие провода, Н, не менее		Масса, кг/км			
	алюминий	сталь	провода	стального сердечника		из алюми- нийной провол- ки марки ПП	из алюми- нийной провол- ки марки АПН	провода (без смазки)	смазки для		смазки и пленки для АСК
									АСКС	АСКП	
10/1,8	10,6	1,77	4,5	1,5	2,76630	—	3790	43	1,0	1,0	13
16/2,7	16,1	2,69	5,6	1,9	1,80334	—	5810	65	1,0	1,0	9
25/4,2	24,9	6,15	6,9	2,3	1,17590	—	8730	100	1,5	1,5	6
35/6,2	36,9	6,15	8,4	2,8	0,78970	—	12 720	148	2,5	2,5	6

Продолжение табл. 12-51

Ном. надвое сечение, мм², алюминий/сталь	Расчетные характеристики проводов марки АС, АСКС, АСКП, АСК											
	Сечение, мм²		Диаметр, мм		Сопротивление по- стоянному току при 20°С, Ом/км, не бо- лее	Разрывное уси- лие провода, Н, не менее		Масса, кг/км				
	алюминий	сталь	провода	стального сердечника		из алюми- новой проволо- ки марк ПТ	из алюми- новой проволо- ки марк АТН	провода (без смазки)	смазки для		смазки и пленки для АСК	
								АСКС	АСКП			
50/8,0	48,2	8,04	9,5	3,2	0,60298	15 710	16 140	195	3,0	3,0	4	
70/11	68,0	11,3	11,4	3,8	0,42859	22 170	22 770	276	4,5	4,5	4	
70/72	68,4	72,2	15,4	11,0	0,42760	—	90 180	755	38	38	22	
95/16	95,4	15,9	13,5	4,5	0,30599	30 690	31 530	385	6,0	6,0	—	
120/19	118,0	18,8	15,2	5,5	0,24917	—	40 520	471	11	35	11	
95/141	91,2	141,0	19,8	15,4	0,32108	—	168 050	1357	69	69	29	
120/27	114,0	26,6	15,4	6,6	0,25298	—	48 680	528	14	37	14	
150/19	148,0	18,6	16,8	5,5	0,19919	—	45 060	554	12	42	11	
150/24	149,0	24,2	17,1	6,3	0,19798	—	50 960	559	14	44	13	
185/24	187,0	24,2	18,9	6,3	0,15701	54 950	56 750	705	14	51	13	
185/29	181,0	29,0	18,8	6,9	0,16218	58 370	60 640	728	16	52	15	
185/43	185,0	43,1	19,6	8,4	0,15954	—	76 020	846	23	61	21	
185/128	187,0	128,0	23,1	14,7	0,15762	—	171 610	1525	63	101	27	
205/27	205,0	26,6	19,8	6,6	0,14294	60 380	62 350	774	15	57	14	
240/32	244,0	31,7	21,6	7,2	0,12060	70 940	73 280	921	17	66	16	
240/39	226,0	38,6	21,6	8,0	0,12428	76 880	79 260	952	22	71	18	
240/56	241,0	56,3	22,4	9,6	0,12182	94 090	96 410	1106	30	78	25	
300/39	301,0	38,6	24,0	8,0	0,09747	87 280	88 780	1132	22	82	18	
300/48	295,0	47,8	24,1	8,9	0,09983	95 720	98 550	1186	27	87	22	
300/66	288,0	65,8	24,5	10,5	0,10226	116 460	119 240	1313	37	95	20	
300/67	288,0	67,3	24,5	10,5	0,10226	112 460	115 230	1317	37	95	20	
300/204	298,0	204,0	29,2	18,6	0,05934	—	266 820	2428	102	164	39	
330/27	319,0	26,6	24,2	6,6	0,09387	—	86 310	1106	12	112	14	
330/43	332,0	43,1	25,2	8,4	0,08888	—	101 540	1255	23	118	21	
400/22	394,0	22,0	26,6	6,0	0,07501	—	92 740	1261	12	133	12	
400/51	394,0	51,1	27,5	9,2	0,07477	113 200	118 130	1490	28	134	24	
400/64	396,0	63,5	27,7	10,2	0,07528	123 100	126 850	1572	35	115	28	
400/93	406,0	93,2	29,1	12,5	0,07247	160 760	164 660	1851	53	133	27	
450/56	434,0	56,3	28,8	9,6	0,06786	124 720	128 500	1640	30	145	25	
500/27	481,0	26,6	29,4	6,6	0,06129	104 000	110 010	1537	15	158	14	
500/64	490,0	63,5	30,6	10,2	0,06005	140 960	145 680	1852	33	163	28	
500/204	486,0	204,0	34,5	18,6	0,06025	293 960	301 100	2979	105	230	25	
500/336	490,0	336,0	37,5	23,9	0,06040	433 120	437 845	4005	168	270	43	
550/71	549,0	71,2	32,4	10,8	0,05381	157 700	162 965	2076	38	184	30	
600/72	580,0	72,2	32,2	11,0	0,05091	169 750	175 314	2170	39	194	22	
650/79	634,0	78,9	34,7	11,5	0,04655	182 500	191 411	2372	42	230	23	
700/86	687,0	85,9	36,2	12,0	0,04269	199 550	208 140	2575	46	253	24	
750/53	748,0	53,2	37,7	12,5	0,03829	217 030	224 230	2800	49	272	27	
800/105	821,0	105,0	39,7	13,3	0,03586	241 030	248 940	3092	57	310	29	
1000/156	1002,9	156,3	42,4	9,6	0,02936	210 100	219 740	3062	50	355	25	

Таблица 12-52

Продолжение табл. 12-52

Допустимые длительные токовые нагрузки на неизолированные провода, А (по данным института «Энергосетьпроект»)

Сечение, мм ²	Марка провода	Марка провода			
		Вне помеще- ний		Внутри по- мещений	
		М	А	М	А
10	АС-10/1,8	84	53	95	—
16	АС-16/2,7	111	79	133	105
25	АС-25/4,2	142	109	183	136
35	АС-35/6,2	175	135	223	170
50	АС-50/8	210	165	275	215
70	АС-70/11	265	210	337	265
95	АС-95/16	330	260	422	320
120	АС-120/19	390	313	485	375
120	АС-120/27	375	—	485	375
150	АС-150/19	450	365	570	440
150	АС-150/24	450	365	570	440
150	АС-150/34	450	—	570	440
185	АС-185/24	520	430	650	500
185	АС-185/29	510	425	650	500

Сечение, мм ²	Марка провода	Вне помеще- ний	Внутри по- мещений	Марка провода			
				М		А	
				Вне по- мещений	Внутри по- мещений	Вне по- мещений	Внутри по- мещений
185	АС-185/43	515	—	650	500	540	410
240	АС-240/32	605	505	760	590	685	490
240	АС-240/39	610	505	760	590	685	490
240	АС-240/56	610	—	760	590	685	490
300	АС-300/39	710	600	880	680	740	570
300	АС-300/48	690	585	880	680	740	570
300	АС-300/66	680	—	880	680	740	570
330	АС-330/27	730	—	—	—	—	—
400	АС-400/22	830	713	1050	815	895	690
400	АС-400/51	825	705	1050	815	895	690
400	АС-400/64	860	—	1050	815	895	690
500	АС-500/27	960	830	—	980	—	820
600	АС-600/72	1050	920	—	1100	—	955
700	АС-700/86	1180	1040	—	—	—	—

Примечание. Длительные токовые нагрузки одинаковы для проводов марок АС, АСКС, АСК и АСКП.

По требованию потребителя алюминиевые и сталеалюминиевые провода марок АКП, АНКП, АЖКП, АСКП могут изготавливаться с наружной поверхностью, покрытой термостойкой смазкой. В этом случае к марке провода добавляют букву З.

Медные неизолированные провода выпускаются в диапазоне сечений от 4 до 400 мм² с числом проволок от 1 до 37, алюминиевые — от 16 до 800 мм² с числом проволок от 7 до 61, из алюминиевого упрочненного сплава — от 16 до 185 мм² с числом проволок от 7 до 19.

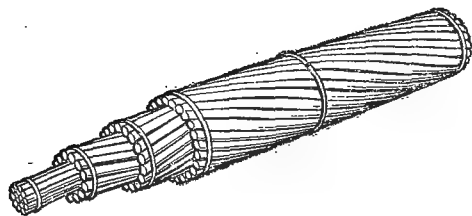


Рис. 12-4. Неизолированный провод для воздушных ЛЭП.

Провода типа АС выпускаются в диапазоне сечений: для сечения алюминиевой части провода — от 10 до 1000 мм², для сечения стального сердечника — от 1,8 до 336 мм². Число проволок, образующих стальной сердечник, колеблется от 1 до 61; алюминиевая часть содержит от 6 до 96 проволок. Отношение сечения алюминиевой части проводов к сечению стального сердечника колеблется в широких пределах (1,46—18,09).

Скрутка средних повивов неизолированных проводов производится в противоположные стороны, причем наружный повив должен иметь правое направление скрутки.

При расчете электрического сопротивления неизолированных проводов постоянному току учитываются коэффициент укрутки проволок, зависящий от их числа, и коэффициент, учитывающий допуск на диаметр проволок. В проводах со стальным сердечником проводимость стального сердечника не учитывается, а за электрическое сопротивление принимается только сопротивление алюминиевой части. При расчете разрывного усилия неизолированных проводов во внимание принимается разрывное усилие проволоки с учетом допуска на диаметр, число проволок, коэффициент, учитывающий наличие мест сращивания, вызывающих снижение механической прочности. Сращивание отдельных медных, алюминиевых, из алюминиевого сплава или стальных проволок при скрутке провода должно производиться сваркой на расстоянии между местами сращивания различных проволок не менее 15 м. Сращивание проволоки при скрутке семипроволочных проводов марок

АН и АЖ не допускается. Также не допускается сращивание однопроволочного медного провода или стального сердечника.

Основные расчетные параметры неизолированных проводов различных типов приведены в табл. 12-48—12-52.

Срок службы неизолированных проводов должен быть не менее: 45 лет — для проводов марок М, А, С; 25 лет — для проводов марок АКП, АН, АНКП, АЖ, АЖКП, АСКП; 10 лет — для проводов марок АСКС, АСК. Естественно, что при этом должны соблюдаться как технические требования, приведенные в документации на провода, так и правила устройства и эксплуатации воздушных линий.

Кабельной промышленностью выпускаются также полые неизолированные провода без поддерживающей опоры, применяемые в воздушных электрических сетях для передачи электроэнергии, для ошиновки станций и переключательных пунктов. Полые провода выпускаются медными (марка ПМ) и алюминиевыми (марка ПА) по ТУ 16.505.397-72.

Полый провод состоит из твердых медных или алюминиевых проволок фасонного сечения, образующих один повив и соединенных друг с другом в замок без поддерживающего каркаса. Медный провод выпускается сечением 240 и 300 мм², алюминиевый — 500 и 600 мм². Срок службы провода — не менее 20 лет.

Медные неизолированные гибкие провода, выпускаемые по ГОСТ 20685-75, применяются в электротехнических установках и устройствах, а также используются в качестве антенн. Провода изготавливаются следующих марок: МА — медный антенный неизолированный, МГ — медный гибкий неизолированный, МГЭ — медный гибкий для электропечей неизолированный. Провода марки МА выпускаются в диапазоне сечений от 1,5 до 16,0 мм² с числом скрученных проволок в жиле от 7 до 19, марки МГ — от 1,5 до 500 мм² с числом проволок от 19 до 703, марки МГЭ — от 240 до 1000 мм² с числом проволок от 570 до 1026. Гибкость проводов обеспечивается за счет скрутки в жилу большого числа тонких проволок и ограничения длины шага скрутки. В проводах марки МГЭ стренги скручиваются вокруг сердечника, состоящего из проплетанной кабельной пряжи. Провода предназначены для работы в условиях относительной влажности воздуха не более 80% при 20°C. Срок службы проводов — не менее 5 лет.

В системах электроснабжения железных дорог применяются многопроволочные неизолированные биметаллические сталеалюминиевые провода, выпускаемые в соответствии с ГОСТ 4775-75. Провода имеют марки ПБСМ1 (первый класс проводимости) и ПБСМ2 (второй класс проводимости). Провода предназначены для работы во всех макроклиматических районах на суше в атмосфере типов I, II и III по ГОСТ 15150-69. Провода марок ПБСМ1 и ПБСМ2 выпуска-

Таблица 12-53

Электрическое сопротивление постоянному току и разрушающая нагрузка проводов марок ПБСМ1 и ПБСМ2

Сечение, мм ²	Сопротивление постоянному току, Ом/км, не более		Разрушающая нагрузка при растяжении, кН, не менее
	ПБСМ1	ПБСМ2	
25	1,752	2,388	17
35	1,352	1,842	22
50	0,955	1,273	32
70	0,660	0,880	46
95	0,509	0,678	60
120	0,405	0,539	75

каются семипроволочными в диапазоне 25—50 мм² и 19-проволочными в диапазоне сечений 70—120 мм². Для изготовления этих проводов используется биметаллическая сталь-медная проволока марок БСМ1 и БСМ2 по ГОСТ 3822-61 диаметром 2,2—3,0 мм. Электрическое сопротивление постоянному току и разрушающая нагрузка при растяжении проводов должны соответствовать значениям, указанным в табл. 12-53.

Средние сроки службы проводов марок ПБСМ1 и ПБСМ2 в атмосфере типов I и II по ГОСТ 15150-69 составляют соответственно 40 и 30 лет, в атмосфере типа III—30 и 20 лет.

Для районов с особо высокой коррозионной активностью атмосферы срок службы проводов марки ПБСМ2 может уменьшиться до 10 лет.

12-14. ШИНЫ И ЛЕНТЫ

Шины и ленты электротехнического назначения выпускаются медными и алюминиевыми. Медные шины и ленты (ГОСТ 434-78) применяются в тех случаях, когда используется их повышенная гибкость, в коррозионных условиях и т. д. Медные ленты выпускаются следующих марок: ЛММ — ленты медные мягкие и ЛМТ — ленты медные твердые. Марки медных шин: ШММ — шины мягкие медные, ШМТ — шины медные твердые, ШМТВ — шины медные твердые из бескислородной меди. Обозначения размеров шин и лент такие же, как и для прямоугольной проволоки: a — меньшая сторона (толщина), b — большая сторона (ширина). Медные ленты выпускаются шириной от 8 до 100 мм и толщиной от 0,10 до 3,53 мм, т. е. их сечения находятся в широком диапазоне от 0,80 до 298 мм². Шины отличаются от лент большей толщиной ($a=4,0 \pm 30,0$ мм). Номинальный размер шин по стороне b составляет от 16 до 120 мм. Минимальное сечение выпускаемых медных шин 180 мм², максимальное — 1500 мм². Предельные отклонения размеров шин по сторонам a и b находятся в пределах от $\pm 0,02$ до 0,35 мм в зависимости от размеров шин. Предельные отклонения самых тонких лент по толщине составляют $\pm 0,01$ мм, самых толстых $\pm 0,06$ мм, по ши-

Таблица 12-54

Механические свойства ленты и мягких шин

Размер a , мм	Относительное удлинение, %, не менее, для марок ЛММ и ШММ	Предел прочности при разрыве, МПа, не менее, для марки ЛМТ
$\leq 0,80$	—	300
0,80—1,32	30	300
1,32—3,35	32	270
3,35—7,00	34	260
7,00	35	—

рине соответственно эти цифры равны $\pm 0,08$ и $\pm 0,35$ мм. Механические свойства ленты и мягких шин должны соответствовать указанным в табл. 12-54.

Шины марки ШММ, которым присвоен государственный Знак качества, должны иметь относительное удлинение 37% для размера a от 3,35 до 7,00 мм и 40% — для размера a свыше 7,00 мм. Число Бринелля шин марок ШМТ и ШМТВ должно быть не менее 65. Механические свойства мягкой ленты толщиной до 1,0 мм проверяются при испытании на вытяжку сферической лунки (по Эрксену). Сепаривность твердых медных шин не должна по стороне b превышать 4 мм на 1 м длины, а для лент толщиной 3 мм и более — 3 мм на 1 м длины. Ленты толщиной до 0,5 мм поставляются в рулонах. Шины упаковываются в пачки. Гарантийный срок хранения лент и твердых шин — 6 мес с момента изготовления, мягких шин — 12 мес.

Неизолированные алюминиевые шины прямоугольного сечения марки ШАТ, предназначенные для токопроводов, распределительных устройств, сборок и других электротехнических целей, выпускаются по ТУ 16-705.002-77. Шины изготавливаются из твердой алюминиевой проволоки. Номинальные размеры, расчетные сечения и предельные отклонения шин по ширине (большей стороне b) должны соответствовать указанному в табл. 12-55.

Таблица 12-55

Номинальные размеры, расчетные сечения и предельные отклонения неизолированных алюминиевых шин

Размеры шин по стороне b , мм	Номинальный размер шин по стороне a , мм						
	3	4	5	6	8	10	12
Расчетное сечение, мм ²							
10 $\pm$ 0,4	30	40	—	—	—	—	—
12 $\pm$ 0,5	36	48	—	—	—	—	—
15 $\pm$ 0,5	45	60	—	—	—	—	—
20 $\pm$ 0,5	60	80	—	—	—	—	—
25 $\pm$ 0,6	75	100	—	—	—	—	—
30 $\pm$ 0,6	90	120	150	—	—	—	—
40 $\pm$ 0,9	120	160	200	—	—	—	—
50 $\pm$ 0,9	—	—	250	300	—	—	—
60 $\pm$ 1,0	—	—	300	360	480	600	—
80 $\pm$ 1,0	—	—	400	480	640	800	—
100 $\pm$ 1,2	—	—	—	600	800	1000	1200
120 $\pm$ 1,2	—	—	—	—	960	1200	1440

Таблица 12-56

Механические свойства образцов из прессованных алюминиевых шин

Марка	Площадь сечения, см ²	Механические свойства при растяжении, не менее		
		Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
АД0	<100	70	—	15
АД31Т	100,1—300	60	60	15
АД31Т1	Все размеры	130	60	13
	То же	200	150	8

Предельные отклонения по толщине составляют: $\pm 0,25$ мм при $a=3$ мм; $\pm 0,30$ мм при 4—6 мм; $\pm 0,40$ мм при 8 и 10 мм; $\pm 0,50$ мм при 12 мм. По требованию потребителя шины могут изготавливаться с радиусом закругления, равным $a/2$. Шины изготавливаются в полосах длиной от 3 до 9 м, а шины толщиной до 6 мм включительно могут поставляться свернутыми в бухтах. Серповидность шин, если они поставляются в полосах, не должна превышать 3 мм на длине 1 м.

Шины изготавливаются из алюминия марки А5Е по ГОСТ 11069-79, причем удельное электрическое сопротивление шин постоянному току не должно превышать 0,0282 мкОм·м. Предел прочности при растяжении шин составляет для сечений до 500 мм² не менее 118 МПа, для сечений свыше 500 мм² — не менее 113 МПа. Относительное удлинение должно быть соответственно не менее 5 и 6%. Срок службы алюминиевых неизолированных шин установлен равным 25 годам.

Прессованные шины прямоугольного сечения электротехнического назначения из алюминия марки АД0 и алюминиевого сплава марки АД31 выпускаются по ГОСТ 15176-70. Шины поставляются следующих марок: АД31Т — закаленные и естественно состаренные, АД31Т1 — закаленные и искусственно состаренные и АД0 — без термической обработки. Прессованные шины выпускаются в диапазоне сечений от 0,30 до 258 см². Ширина шин колеблется от 6 до 500 мм, толщина — от 3 до 110 мм.

Удельное электрическое сопротивление постоянному току для шин из алюминия марки АД0 — не более 0,0290 мкОм·м, для шин из алюминиевого сплава марки АД31Т1 — не более 0,0325 мкОм·м, для шин из сплава АД31Т — не более 0,0350 мкОм·м.

Механические свойства образцов, вырезанных из шин в продольном направлении, должны удовлетворять требованиям, указанным в табл. 12-56.

Прессованные алюминиевые шины поставляются в пачках массой не более 300 кг, а термически не обработанные шины немер-

ной длины толщиной до 6 мм могут поставляться в бухтах с наружным диаметром не более 1200 мм.

12-15. КОНТАКТНЫЕ ПРОВОДА

Основная часть контактных проводов изготавливается из низколегированной меди и бронз. Контактные провода применяются в воздушных электрических сетях для передачи энергии электротранспорту.

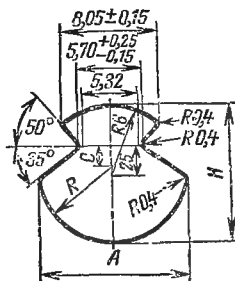


Рис. 12-5. Конструкция фасонного контактного провода.

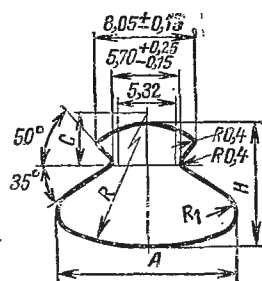


Рис. 12-6. Конструкция фасонного овального контактного провода.

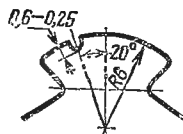


Рис. 12-7. Контактный провод с отличительной канавкой.

Бесстыковые медные низколегированные и бронзовые контактные провода выпускаются в соответствии с ГОСТ 2584-75. Провода изготавливаются фасонными круглыми (рис. 12-5) и фасонными овальными (рис. 12-6). Типы выпускаемых проводов и условия их применения указаны в табл. 12-57.

Номинальные сечения, номинальные диаметры и расчетная масса круглых проводов должны соответствовать указанным в табл. 12-58.

Номинальные сечения, размеры, допустимые отклонения и расчетная масса фасонных и фасонных овальных проводов приведены в табл. 12-59.

Бронзовые контактные провода должны иметь на верхней части сечения одну, а низколегированные медные — две отличительные канавки (рис. 12-7). Строительные длины проводов в зависимости от сечения составляют 1000—5500 м.

Медные контактные провода должны изготавливаться из катанки, полученной методом непрерывного литья и прокатки, со светлой поверхностью, не требующей последующего травления. Марка фасонных и фасонных овальных проводов устанавливается в зависимости от химического состава. Так, фасонный низколегированный провод с присадкой 0,05% Mg обозначается как ЕЛМг0,05Ф, 0,05% Zr — НЛЦр0,05Ф

Таблица 12-57

Марки проводов	Наименование проводов	Условия применения	
		Допустимая температура, °С	Предел прочности при разрыве, МПа
МК	Контактный медный круглый	90	118
МФ	Контактный медный фасонный	95	118
МФО	Контактный медный фасонный овалыный	95	118
НЛФ	Контактный низколегированный фасонный	110	127
НЛФО	Контактный низколегированный фасонный овалыный	110	127
БрФ	Контактный бронзовый фасонный	130	137
БрФО	Контактный бронзовый фасонный овалыный	130	137

Таблица 12-60

Механические свойства медных и низколегированных контактных проводов							
Номинальное сечение провода, мм ²	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее		Относительное удлинение, %, не менее		Число перегибов в плоскости симметрии до полного разрушения, не менее	Радиус гибки при испытании на перегиб, мм	Число скручиваний фасонного провода вокруг оси до разрушения
	для медных проводов	для низколегированных проводов	для медных проводов	для низколегированных проводов			
30	405	410	1,5	1,5	3	10	—
40	395	400	2,0	2,0	3	10	—
50	395	400	2,5	2,5	3	10	—
65	380	390	3,0	3,0	3	13	4
85	375	385	3,5	3,0	3	16	4
100	370	385	4,0	3,5	3	18	4
120	365	375	4,0	3,5	3	18	4
150	360	370	4,0	3,5	3	20	4

Таблица 12-61

Механические свойства бронзовых контактных проводов

Номинальное сечение провода, мм ²	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее				Относительное удлинение, %, не менее	Число перегибов в плоскости симметрии до полного разрушения, не менее	Радиус гибки при испытании на перегиб, мм	Число скручиваний провода вокруг оси до разрушения
	кадмием	магнием	цирконием	магнием и цирконием				
65	440	430	450	440	3,0	3	13	5
85	440	430	450	440	3,0	3	16	5
100	430	420	440	430	3,5	3	16	5
120	420	410	430	420	4	3	18	5
150	410	400	420	410	4	3	20	5

Таблица 12-58

Основные размеры круглых контактных проводов

Номинальное сечение, мм ²	Номинальный диаметр, мм	Расчетная масса 1 км провода, кг	Номинальное сечение, мм ²	Номинальный диаметр, мм	Расчетная масса 1 км провода, кг
30	6,2	267	65	9,1	578
40	7,1	356	85	10,4	755
50	8,0	445	100	11,3	890

Таблица 12-59

Основные размеры фасонных и фасонных овалыных проводов

Сечение, мм ²	Размеры проводов, мм				Расчетная масса 1 км провода, кг
	фасонных		фасонных овалы- ных		
	A	H	A	H	
65	10,19± ±0,20	9,30± ±0,08	—	—	578
85	11,76± ±0,22	10,80± ±0,10	—	—	755
100	12,81± ±0,25	11,80± ±0,11	14,92± ±0,30	10,50± ±0,10	890
120	13,90± ±0,30	12,90± ±0,12	16,10± ±0,32	11,50± ±0,11	1068
150	15,50± ±0,32	14,50± ±0,13	18,86± ±0,35	12,50± ±0,12	1335

Таблица 12-62

Сравнительная износостойкость контактных проводов

Марки проводов	Допустимый износ контактных проводов, мм ² , не более, на 10 000 проходов токоприемников, оборудованных медными токосъемными пластинами, при потреблении тока электропоездов составом в следующих диапазонах		
	<1000 А	1000—2000 А	>2000 А
МФ100	0,30	0,65	1,00
НЛФ100	0,25	0,58	0,85
БрМг0,25Ф	0,15	0,40	0,70
БрЦр0,5Ф	0,07	0,30	0,50
БрКд1Ф	0,13	0,35	0,60

и т. д. В качестве присадок для низколегированных контактных проводов используются Mg (0,04—0,06%), Zr (0,04—0,06%), Sn (0,03—0,06%), Si (0,03—0,06%), Ti (0,01—0,04%). Легирующими компонентами меди для бронзовых контактных проводов являются Mg (0,10—0,30%) для BrMg0,25Ф, Cd (0,8—1,1%) для BrKd0,1Ф, Zr (0,1—0,6%) для BrZr0,5Ф. Удельное электрическое сопротивление проводов постоянному току при температуре 20°C должно быть не более 0,0176 Ом·мм для медных проводов, 0,0185— для низколегированных, 0,0205— для проводов из кадмиевой бронзы, 0,0220— из магниевой бронзы, 0,0200— из циркониевой бронзы, 0,0215— из магниеводородной бронзы.

Механические свойства медных и низколегированных контактных проводов и бронзовых контактных проводов приведены в табл. 12-60 и 12-61 соответственно.

Сравнительная износостойкость контактных проводов должна соответствовать данным, приведенным в табл. 12-62.

Значения сравнительной износостойкости бронзовых контактных проводов, изготовленных из трехкомпонентных сплавов, должны быть на 10—15% выше, чем у проводов из циркониевой бронзы. Срок службы медных контактных проводов — не менее 6 лет, низколегированных — не менее 8 лет, бронзовых — не менее 15 лет.

12-16. ПРОФИЛИ ДЛЯ КОЛЛЕКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Профили для коллекторов электрических машин (рис. 12-8) изготавливаются из меди и из меди, легированной серебром, мед-

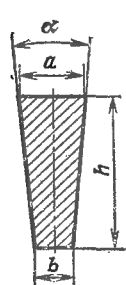


Рис. 12-8. Форма медного профиля для коллекторов электрических машин.

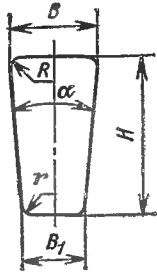


Рис. 12-9. Форма профиля из меди, легированной серебром, для коллекторов электрических машин.

ные коллекторные профили марки ПКМ изготавливаются по ГОСТ 4568-70. Химический состав должен соответствовать меди марок М00, М06 и М1 по ГОСТ 859-78. Профили из меди марок М00, М06 и М1 должны изготавливаться из слитков по ГОСТ 193-67. Предельные отклонения медных трапециевидных профилей должны соответствовать указанным в табл. 12-63.

Таблица 12-63

Предельные отклонения медных коллекторных профилей, мм

Толщина сторо- пы профиля	Предельные отклоне- ния по толщине стороны профиля			Высота профи- ля h	Предельные от- клонения по вы- соте профиля h
	Точность изготовления				
	высо- кая	повы- шен- ная	нор- маль- ная		
$\Delta 3$	—0,020	—0,04	—0,06	$\Delta 18$	—0,2
3—6	—0,025	—0,05	—0,03	18—30	—0,3
6—10	—0,030	—0,06	—0,10	30—50	—0,5
10—18	—0,035	—0,07	—0,12	50—80	—0,6
				80—125	—1,0

Номинальные размеры поперечного сечения профиля должны соответствовать требованиям заказчика. В заказе указываются также угол α и номинальная толщина сторон профиля a и b . Коллекторные профили поставляются в полосах длиной 1—1,5 м. Точность изготовления профиля проверяется с помощью шаблона. Боковые стороны профиля при введении его в шаблон должны плотно прилегать к сторонам шаблона. Плотность прилегания проверяется щупом по ГОСТ 882-75 размером 0,03×10,0 мм при $h < 50$ мм или щупом размером 0,05×10,0 мм при $h > 50$ мм. При проверке щуп не должен проходить между сторонами профиля и шаблона.

Серповидность сторон профилей при высоте более 30 мм не должна превышать 3 мм на 1 м длины, а для профилей высокой точности изготовления, выпускаемых с государственным Знаком качества, 1,5 мм на 1 м длины. Для профилей высотой менее 30 мм и профилей, поставляемых в бухтах (это допускается по соглашению сторон), серповидность не нормируется. Число Бринелля для профилей в состоянии поставки должно быть не менее 80, а профилей любой точности изготовления, выпускаемых с государственным Знаком качества, — не менее 90.

Профили для коллекторов электрических машин из меди, легированной серебром, марки ПКМС выпускаются по ТУ 16-501.013-73. Форма поперечного сечения профиля должна соответствовать указанной на рис. 12-9. Радиусы скругления углов, образованных основаниями и боковыми сторонами профиля, не нормируются. Номинальные размеры поперечного сечения профилей должны быть указаны на чертеже заказчика. Сечение профиля рассчитывают по формуле

$$S = \frac{B + B_1}{2} H.$$

Профили выпускаются в диапазоне сечений от 160 до 900 мм²; размеры профилей: $B_1 \geq 2,0$ мм, $H = 35 \div 115$ мм; угол $\alpha \leq 4^\circ$. Предельные отклонения по стороне профиля B и высоте H должны соответствовать указанным в табл. 12-64.

Таблица 12-64

Предельные отклонения коллекторных профилей из меди, легированной серебром, мм

В	Предельные отклонения по В			Н	Предельные отклонения по Н
	Точность изготовления				
	высокая	повышенная	нормальная		
≤3	—0,020	—0,04	—0,06	35—85	—0,5
3—6	—0,025	—0,05	—0,08	85—95	—0,8
6—10	—0,025	—0,06	—0,10	95—115	—1,0

Профили должны поставляться в поло-сах длиной не менее 1,0 м. По согласованию сторон допускается поставка профилей в бухтах.

Для изготовления профилей используются медные слитки, легированные серебром, по ТУ 48-21-137-72.

Форма и поперечные размеры профиля должны соответствовать шаблону, изготавливаемому заказчиком. Способ проверки аналогичен применяемому при проверке медных коллекторных полос. Однако используется шесть типов шупов: $0,02 \times 10$; $0,03 \times 10$; $0,04 \times 10$; $0,05 \times 10$; $0,06 \times 10$; $0,08 \times 10$ (размеры в мм). При этом в технических условиях оговаривается глубина проникновения шупа в зазор между профилем и шаблоном.

Серповидность профилей не должна превышать: для профилей высокой точности изготовления — 1,5 мм на 1 м длины; для профилей повышенной и нормальной точности изготовления — 3 мм на 1 м длины.

Твердость профилей в состоянии поставки должна быть не менее указанной в табл. 12-65.

Таблица 12-65

Твердость коллекторных профилей из меди, легированной серебром

Точность изготовления профилей	Диапазон сечений, мм ²	Н, мм, не более	α, не более	Число Бринелля в состоянии поставки не менее
Высокая	<470	101	2	90
	>470	115	4	84
Повышенная	<900	115	4	80
Нормальная	<900	115	4	80

После нагревания профилей до температуры 300°C в течение 1 ч и последующего охлаждения до температуры окружающей среды твердость полос не должна снижаться более чем на 5 единиц по сравнению со значениями, регламентированными в ТУ для полос в состоянии поставки.

Для профилей с числом твердости по Бринеллю в состоянии поставки не менее 90 предел прочности при разрыве должен быть не менее 300 МПа, относительное удлинение — менее 5%. После нагревания до температуры 300°C и последующего охлаждения предел прочности при разрыве и относительное удлинение должен быть не менее 280 МПа и 7% соответственно.

12-17. ЦЕНЫ

Цены на некоторые проводниковые материалы и некоторые изготавливаемые из них проволоки и ленты приведены в табл. 12-66.

Таблица 12-66

Цены на некоторые проводниковые материалы и полуфабрикаты из них

Наименование металла или полуфабриката	Техническая документация	Цена, руб/т
Медь	ГОСТ 859-78	890—1000
Латунь, обрабатываемая давлением	ГОСТ 15527-70	680—830
Бронзы оловянные, обрабатываемые давлением	ГОСТ 18175-79	950—7030
Алюминий	ГОСТ 11069-74	700—800
Манганин	ГОСТ 492-73	1280—3000
Проволока манганиновая	ГОСТ 10155-75	1320—12 500
Проволока константановая	ГОСТ 5307-77	2480—6300
Проволока никромовая	ГОСТ 8803-58	7100—162 900

Примерные цены на медную и алюминиевую проволоку, неизолированные провода, шины и ленты, контактные провода, коллекторные полосы приведены в табл. 12-67.

Указанный в табл. 12-66 и 12-67 диапазон цен определяется в основном диапазоном размеров или сечений перечисленных материалов и полуфабрикатов.

Т а б л и ц а 12-67

Примерные цены на медную и алюминиевую проволоку, неизолированные провода, шины и ленты, контактные провода и коллекторные полосы

Наименование кабельной продукции	Техническая документация	Цена, руб/т
Медная проволока круглая мягкая марки ММ	ГОСТ 2112-71	1005—1620
Медная проволока круглая твердая марки МТ	ГОСТ 2112-71	1000—66 200 ($\varnothing 0,02$ мм)
Медная проволока прямоугольного сечения мягкой марки ПММ	ГОСТ 434-78	160—980
Медная проволока прямоугольного сечения твердая марки ПМТ	ГОСТ 434-78	160—950
Алюминиевая проволока круглая мягкая марки АМ	ГОСТ 6132-71	840—8580 ($\varnothing 0,10$ мм)
Алюминиевая проволока круглая твердая марки АТ	ГОСТ 6132-71	830—8570 ($\varnothing 0,10$ мм)
Алюминиевая проволока круглая полутвердая марки АПТ	ГОСТ 6132-71	840—8580 ($\varnothing 0,10$ мм)
Алюминиевая проволока прямоугольного сечения мягкой марки ПАМ	ГОСТ 10687-76	500—820
Алюминиевая проволока прямоугольного сечения твердая марки ПАТ	ГОСТ 10687-76	500—810
Неизолированные провода медные марки М	ГОСТ 839-79	1010—1045
Неизолированные провода алюминиевые марки А	ГОСТ 839-79	740—800
Неизолированные провода сталеалюминиевые марки АС	ГОСТ 839-79	500—755
Неизолированные провода алюминиевые коррозионно-стойкие марки АКП	ГОСТ 839-79	730—755
Неизолированные провода сталеалюминиевые коррозионно-стойкие марок АСКС, АСКП, АСК	ГОСТ 839-79	570—800
Неизолированные провода из нетермообработанного алюминия марки АН	ГОСТ 839-79	845—880
Неизолированные провода из термообработанного алюминия марки АЖ	ГОСТ 839-79	965—1020
Полые воздушные провода медные марки ПМ	ТУ 16-505.397-72	1070—1085
Полые воздушные провода алюминиевые марки ПА	ТУ 16-505-72	960—1025
Неизолированные провода гибкие медные марок МА, МГ, МГЭ	ГОСТ 20685-75	990—1390
Многопроволочные неизолированные биметаллические сталеалюминиевые провода марок ПБСМ1 и ПБСМ2	ГОСТ 4775-75	695—780
Медные шины мягкие марки ПММ	ГОСТ 434-78	1005—1025
Медные шины твердые марки ПМТ	ГОСТ 434-78	1000—1020
Шины твердые из бескислородной меди марки ПМТВ	ГОСТ 434-78	1130—1145
Медные ленты мягкие марки ЛММ	ГОСТ 434-78	1100—1290
Медные ленты твердые марки ЛМТ	ГОСТ 434-78	1100—1350
Неизолированные алюминиевые шины марки ПАТ	ТУ 16-705.002-77	835—890
Прессованные алюминиевые шины из алюминия и алюминия сплава марок АД31Т, АД31Т1 и АД0	ГОСТ 15176-70	990
Медные коллекторные профили марки ПКМ	ГОСТ 3568-70	1030—1120
Коллекторные профили из меди, легированной серебром, марки ПКМС	ТУ 16.501.013-73	1440—1495
Контактные провода медные круглые марок МКФ и МКФО	ГОСТ 2584-75	960—980

Список литературы

12-1. Электротехнический справочник. Изд. 5-е/Под общ. ред. П. Г. Грудинского и др. Т.1 — М.: Энергия, 1975. — 775 с.

12-2. Справочник по электротехническим материалам. Изд. 2-е/Под ред. Ю. В. Кордюкова, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Т. 3 — М.: Энергия, 1976. — 896 с.

12-3. Готман П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М. Электротехнические материалы. Справочник. — М.: Энергия, 1969. — 544 с.

12-4. Цветные металлы и сплавы. Справочник/М.Б. Таубкин, С. А. Цукерман, Д. Г. Карпачев и др. — М.: Металлургия. Т. 1, 1975. — 216 с.; Т. 2, 1975. — 207 с.

12-5. Прецизионные сплавы. Справочник/Под ред. Б. В. Молотилова. — М.: Металлургия, 1974. — 448 с.

12-6. Усов В. В., Займовский А. С. Проводниковые, резистивные и контактные материалы. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1957. — 184 с.

12-7. Ейльман Л. С. Проводниковые мате-

риалы в электротехнике. — М.: Энергия, 1974. — 168 с.

12-8. Металлы и сплавы для электровакуумных приборов/А. С. Гладков, В. М. Амосов, Ч. В. Копецкий, А. М. Левин — М.: Энергия, 1969. — 599 с.

12-9. Воронцова Л. А., Маслов В. В., Пешков И. Б. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях. — М.: Энергия, 1971. — 223 с.

12-10. Сверхпроводящие материалы/Е. М. Савицкий, Ю. В. Ефимов, Н. Д. Козлова и др. — М.: Металлургия, 1976. — 296 с.

12-11. Свалов Г. Г., Белый Д. И. Сверхпроводящие и криорезистивные обмоточные провода. — М.: Энергия, 1976. — 168 с.

12-12. Реут Е. К., Саксонов И. Н. Электрические контакты. — М.: Воениздат, 1971. — 160 с.

12-13. Лившиц П. С. Скользящий контакт электрических машин. — М.: Энергия, 1973. — 272 с.

12-14. Белоруссов Н. И., Саакян А. Е., Яковлева А. И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. Изд. 4-е. — М.: Энергия, 1979. — 416 с.

Раздел 13

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ИЗОЛЯТОРЫ

СОДЕРЖАНИЕ

13-1. Общие требования к электроизоляционным конструкциям	397	Общие сведения (407). Расчет электрических полей (407). Расчет механической прочности изоляторов (409). Расчет опорного изолятора (409). Расчет проходного изолятора (410).
13-2. Электрическая прочность типовых электроизоляционных промежутков	401	13-4. Изоляторы переменного тока высокого напряжения 50 Гц
Общие сведения (397). Изоляция внешняя и внутренняя (398). Требования к электрической прочности изоляторов (399).		Назначение и классификация изоляторов (411). Опорные изоляторы (411). Проходные изоляторы (413). Линейные изоляторы (416).
13-3. Расчеты изоляторов	407	13-5. Вводы на 110 кВ и выше
		13-6. Изоляционные конструкции
		Колонки из опорных изоляторов (420). Гирлянды из линейных изоляторов (420).
		Список литературы
		422

13-1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫМ КОНСТРУКЦИЯМ

Общие сведения

Электрические изоляторы и сооружения из них представляют собой самостоятельные конструкции, используемые в распределительных устройствах или в различного рода электротехнических установках, а также входящие в состав многих электрических аппаратов. Во всех случаях изоляторы выполняют вполне определенные функции: с их помощью осуществляется механическое крепление токоведущих частей, в некоторых случаях передается механическое движение, например от привода к подвижному контакту коммутационного аппарата.

Как элементы механического крепления изоляторы обеспечивают необходимое взаимное расположение токоведущих, заземленных и других частей установки и, тем самым, требуемый уровень электрической прочности на всех участках. Одновременно обеспечивается неизменность и других параметров, которые могут иметь важное значение для работы всей установки, например индуктивность контура, волновое сопротивление токопровода и т. д.

Основные характеристики изоляторов — габариты, масса, стойкость — существенно влияют на общие технико-экономические показатели всей установки в целом. Это влияние резко возрастает с увеличением номинального напряжения. В установках сверхвысокого напряжения характеристики изоляторов могут иметь определяющее значение,

от них может зависеть целесообразность создания всей установки.

Изоляторы, работающие в составе электротехнической установки и выполняющие в ней свои функции, подвергаются внешним электрическим, механическим и тепловым воздействиям, а также воздействию окружающей среды. Комплекс этих воздействий, т. е. напряжения, температуры, механические усилия и др., определяют условия работы изоляторов и их поведение в эксплуатации. Из всех возможных воздействий обычно выделяют рабочие, т. е. те, которые имеют место при нормальных режимах работы установки. Эти воздействия могут случайным образом изменяться во времени, однако, как правило, в сравнительно небольших или в заведомо известных пределах. Главная особенность их состоит в том, что они практически непрерывно и длительно воздействуют на изоляторы. Наряду с рабочими воздействиями при особых режимах установки могут возникать кратковременные воздействия на изоляторы, значительно превышающие рабочие, например грозовые или внутренние перенапряжения, ударные механические нагрузки от протекания больших токов короткого замыкания и др.

Длительные рабочие воздействия вызывают в изоляторах относительно медленные процессы естественного, нормального старения — необратимого постепенного снижения электрической и (или) механической прочности. Эти процессы определяют сроки службы или ресурс изоляторов. Кратковременные случайные воздействия повышенной интенсивности могут вызывать мгновенные отказы из-за пробоя, перекрытия по поверх-

ности или механического разрушения. Отказ изолятора в любой форме влечет за собой, как правило, отказ всей установки или нежелательное изменение режима ее работы.

Таким образом, в общем случае требования к изоляторам определяются с учетом выполняемых ими функций и на основе тщательного анализа ожидаемых условий эксплуатации, т. е. возможных внешних воздействий, а также влияние характеристик изоляторов на технико-экономические показатели всей установки в целом.

Изоляция внешняя и внутренняя

В любом изоляторе или изоляционной конструкции можно выделить:

внешнюю изоляцию — участки, электрическая прочность которых определяется пробоем промежутков в атмосферном воздухе или перекрытием в воздухе по поверхности изоляционных деталей;

внутреннюю изоляцию — участки, электрическая прочность которых определяется пробоем промежутков, заполненных газом (не атмосферным воздухом), жидким или твердым изоляционным материалом, или перекрытием в газообразном или жидком диэлектрике по изолирующим поверхностям.

Целесообразность выделения в изоляционной конструкции участков внешней и внутренней изоляции обусловлена специфическими особенностями соответствующих изоляционных промежутков, существенными различиями в методах их проектирования и испытания.

На электрическую прочность внешней изоляции сильное влияние оказывают атмосферные условия. Разрядные напряжения чисто воздушных промежутков зависят от давления, температуры и влажности воздуха, а характеристики промежутков в воздухе вдоль поверхности изолятора — от количества и свойств загрязнений, осевших на эту поверхность.

При загрязнении и увлажнении поверхности изолятора качественно меняется механизм развития разряда и сильно снижается разрядное напряжение. Последнее оказывается пропорциональным длине пути утечки по поверхности и зависит от геометрии поверхности изолятора и от удельной проводимости слоя загрязнения.

Характеристики слоя загрязнения в свою очередь зависят:

от степени загрязненности атмосферы, т. е. от вида и интенсивности источников загрязнения, от ветровых условий;

от химического состава загрязняющего вещества, особенно от содержания водорастворимых и цементирующихся компонентов, определяющих проводимость и прочность слоя загрязнения;

от аэродинамических свойств изолятора, определяющих поле скоростей воздушного потока у поверхности изолятора;

от ветровых условий и интенсивности

мокрых осадков в данной местности, определяющих интенсивность осаджения и удаления загрязнений, а также степень увлажнения слоя на поверхности изолятора.

Таким образом, многие факторы, влияющие на интенсивность загрязнения поверхности изолятора и свойства слоя загрязнения, т. е. влияющие на разрядное напряжение, сильно зависят от местных условий и могут изменяться в широких пределах. Поэтому при проектировании внешней изоляции конструкции наружной установки необходим строгий учет атмосферных условий в конкретной заданной местности.

Особенность внешней изоляции состоит также в том, что ее электрическая прочность после пробоя или перекрытия и быстрого отключения может через короткое время полностью восстанавливаться до исходного уровня. Практическое значение этого состоит в том, что в редких, особо неблагоприятных условиях можно допускать перекрытие внешней изоляции, а дальнейшую нормальную работу всей установки обеспечивать, скажем, путем применения АПВ.

Электрическая прочность внутренней изоляции практически не зависит от атмосферных условий. Точнее, на поведение внутренней изоляции не влияют случайные и сравнительно быстрые колебания температуры и влажности окружающего воздуха, если они не выходят за пределы допустимых. На работу внутренней изоляции оказывают влияние только средние за относительно длительный период времени значения температуры и влажности окружающего воздуха.

Механизм пробоя внутренней изоляции изолятора может быть существенно разным при электрических воздействиях разной длительности. Соответственно разными будут и пробивные напряжения. Экспериментально установлено, что для многих видов внутренней изоляции пробивное напряжение при временах воздействия, составляющих несколько десятков микросекунд, характерных для грозовых перенапряжений, может в десятки раз превышать пробивные напряжения при воздействиях длительностью в несколько лет, соответствующих воздействию рабочего напряжения.

Полную информацию внутренней изоляции дают так называемые вольт-временные характеристики — зависимости пробивного напряжения от длительности воздействия в диапазоне от микросекунд до десятков лет. Однако полное определение таких характеристик связано с большими трудностями, поэтому в инженерной практике ими не пользуются.

При проектировании внутренней изоляции оборудования энергосистем, в том числе и изоляторов, в соответствии с возможными видами электрических воздействий пользуются данными:

о кратковременной электрической прочности при грозовых перенапряжениях, которые определяют экспериментально путем приложения к изо-

ляции стандартных импульсов 1, 2/50 (ГОСТ 1516.2-76);

о кратковременной электрической прочности при внутренних перенапряжениях, которые получают экспериментально при приложениях стандартных коммутационных импульсов 250/2500 или иной формы или при одномоментном воздействии напряжений промышленной частоты (ГОСТ 1516.2-76);

о длительной электрической прочности, как о способности изоляции выдерживать воздействие рабочего напряжения в течение требуемого срока службы.

Длительная электрическая прочность внутренней изоляции в отличие от кратковременной не может быть непосредственно измерена в лабораторном эксперименте. Поэтому ее оценивают косвенным путем, прежде всего по результатам измерения характеристик частичных разрядов (ГОСТ 20074-74), так как эти разряды являются основной причиной электрического старения внутренней изоляции. Обычно используется условие $U_{\text{раб}} < U_{\text{ч.р.}}$, где $U_{\text{ч.р.}}$ — напряжение возникновения частичных разрядов. Для некоторых видов внутренней изоляции частичные разряды ограниченной интенсивности допустимы, однако обоснованные и проверенные практикой нормы пока отсутствуют.

При длительном воздействии рабочего напряжения должна быть исключена и возможность теплового пробоя внутренней изоляции. Как известно, напряжение теплового пробоя при прочих равных условиях зависит от $t_{\text{гд}}$ изоляции, характеризующего диэлектрические потери. Условие $U_{\text{раб}} < U_{\text{т.проб}}$, где $U_{\text{т.проб}}$ — напряжение теплового пробоя при возможных наиболее неблагоприятных условиях охлаждения, определяет практически требования к $t_{\text{гд}}$ изоляции, т. е. к качеству исходных материалов, к технологии изготовления всей изоляции, к мерам ограничения ее загрязнения (увлажнения) в условиях эксплуатации.

Для всех видов внутренней изоляции характерны сравнительно большие разбросы кратковременной и длительной электрической прочности; коэффициент вариации может составлять 10—15% и более. Поэтому при проектировании внутренней изоляции пользуются так называемыми допустимыми значениями соответствующих напряжений или напряженностей. Последние определяются путем статистической обработки опытных данных с использованием экстремальных функций распределения (Вейбулла, двойного экспоненциального). В качестве допустимых принимаются значения, соответствующие весьма малой вероятности появления. Как правило, допустимые напряжения или напряженности, полученные по данным лабораторных экспериментов, затем проверяются и уточняются по результатам эксплуатации.

В большинстве случаев пробой внутренней изоляции представляет собой необратимое повреждение изолятора. Исключение

составляют только участки внутренней изоляции в виде газовых промежутков. Поэтому внутренняя изоляция обычно проектируется с большими запасами по электрической прочности, чем изоляция внешняя.

Требования к электрической прочности изоляторов

Изоляторы и изоляционные конструкции должны выдерживать без пробоя или перекрытия возможные в эксплуатации грозовые и внутренние перенапряжения. Конкретные требования к уровню электрической прочности изоляторов и изоляционных конструкций по отношению к перенапряжениям — это значения испытательных напряжений. Последние устанавливаются с учетом используемых в сетях разных классов напряжений средств ограничения перенапряжений и нормируются ГОСТ 1516.1-76. Испытательные напряжения изоляторов с нормальной изоляцией, испытываемых отдельно (от трансформаторов, реакторов, аппаратов), установленные ГОСТ 1516.1-76, приведены в табл. 13-1.

В ГОСТ 1516.1-76 указывается, что пробивное напряжение внутренней изоляции изоляторов должно быть больше испытательного напряжения промышленной частоты для внешней изоляции в сухом состоянии не менее чем в 1,2 раза для изоляторов с внутренней жидкой или бумажно-масляной изоляцией и не менее чем в 1,6 раза для остальных изоляторов.

Для изоляторов, входящих в состав трансформаторов, реакторов или аппаратов и испытываемых совместно с ними, используются испытательные напряжения, установленные ГОСТ 1516.1-76 для соответствующего вида оборудования.

Требования к длительной электрической прочности внутренней изоляции изоляторов определяются наибольшим рабочим напряжением и необходимым сроком службы изолятора (15—30 лет и более). Практически, как уже отмечалось ранее, это требование означает необходимость соблюдения условия $U_{\text{раб}} < U_{\text{ч.р.}}$ с учетом статистических разбросов последней величины, а также условия $U_{\text{раб}} < U_{\text{т.проб}}$.

Требования к электрической прочности внешней изоляции изоляторов наружной установки по отношению к рабочему напряжению в условиях загрязнения и увлажнения определяются нормами на удельные, т. е. отнесенные к 1 кВ наибольшего рабочего линейного напряжения, длины пути утечки по поверхности изолятора. Эти нормы, установленные ГОСТ 9920-75 для трех категорий (исполнений) аппаратов и изоляторов, приведены в табл. 13-2. Изоляторы категории А предназначены для работы в «нормальных» условиях по загрязненности атмосферы, изоляторы категории Б — при повышенной загрязненности и изоляторы категории В — при особо загрязненной атмосфере.

Таблица 13-1

Нормированные испытательные напряжения изоляторов с нормальной изоляцией, испытываемых отдельно (от трансформаторов, реакторов и аппаратов), кВ

Класс напряжения оборудования, кВ	Напряжение грозовых импульсов для испытания внешней изоляции					Напряжение коммутационного импульса для испытания внешней изоляции в сухом состоянии и под дождем	Кратковременные напряжения промышленной частоты							
	изоляторов (кроме шинных опор и вводов для нейтрали)		шинных опор		вводов для нейтрали		одноминутное			при плавном подъеме				
							для испытания внутренней изоляции			для испытания внешней изоляции				
	Полный импульс	Срезанный импульс	Полный импульс	Срезанный импульс	Полный импульс		изоляторов (кроме вводов)	вводов для трансформаторов, реакторов и аппаратов	вводов для нейтрали	в сухом состоянии			под дождем	
							изоляторов (кроме вводов)	вводов для трансформаторов, реакторов и аппаратов	вводов для нейтрали	изоляторов (кроме шинных опор и вводов для нейтрали)	шинных опор	вводов для нейтрали	изоляторов (кроме вводов для нейтрали)	вводов для нейтрали
3	44	52	42	50	—	—	24	24	—	27	26	—	20	—
6	60	73	57	70	—	—	32	32	—	36	34	—	26	—
10	80	100	75	90	—	—	42	42	—	47	45	—	34	—
15	105	125	100	120	—	—	55	55	—	63	60	—	45	—
20	125	158	120	150	—	—	65	65	—	75	70	—	55	—
24	150	185	140	175	—	—	75	75	—	85	80	—	65	—
27	170	210	160	200	—	—	80	80	—	95	90	—	70	—
35	195	240	185	230	—	—	95	95	—	110	105	—	85	—
110	480	600	460	570	200	—	230	265	130	295	280	135	215	110
150	660	825	650	785	275	—	300	340	160	375	355	195	290	155
220	950	1190	900	1130	400	—	440	490	265	550	520	280	425	215
330	1200	1400	1150	1350	—	950	560	630	—	700	670	—	550	—
500	1600	1950	1600	1950	—	1300	760	800	—	900	900	—	740	—
750	2100	2550	—	—	—	1550	—	800	—	1000	—	—	900	—
1150	2900	3200	—	—	—	2100	1150	1150	—	1300	—	—	1300	—

Примечание. Испытательные напряжения для изоляторов всех классов напряжения, кроме 750 и 1150 кВ, нормированы ГОСТ 1516.1-76; для 750 кВ указаны испытательные напряжения по ГОСТ 20690-75 для силовых трансформаторов; для 1150 кВ — нормы предварительные.

Таблица 13-2

Удельная длина пути утечки изоляции аппаратов наружной установки (ГОСТ 9920-75)

Категория аппарата	Удельная длина пути утечки, м/МВ (не менее), изоляции аппарата, установленного в системах	
	с заземленной нейтралью	с изолированной нейтралью
А	15,0	17,0
Б	22,5	26,0
В	31,0	35,0

Как видно из табл. 13-2, удельные длины пути утечки для изоляторов сетей с изолированной нейтралью должны быть несколько большими, чем для сетей с заземленной нейтралью. Объясняется это тем, что в сетях с изолированной нейтралью возможна длительная работа с замыканием одной фазы на землю, когда на изоляцию «здоровых» фаз действует полное линейное напряжение.

При проектировании воздушных линий и открытых распределительных устройств изоляторы выбирают с внешней изоляцией, удовлетворяющей требованиям Руководящих указаний [13-5]. В этих Руководящих указаниях используется понятие эффектив-

ной длины пути утечки L_0 , под которой понимается фактически используемая в данной изоляционной конструкции длина пути утечки при развитии разряда вдоль загрязненной и увлажненной поверхности. Для изоляторов сложной формы из-за неравномерного по поверхности осаждения загрязнений и возможного отрыва канала разряда от поверхности длина L_0 может быть меньше геометрической длины пути утечки L . Соотношение между L_0 и L имеет вид: $L_0 = L/k$, где k — коэффициент эффективности, значения которого в зависимости от отношения геометрической длины пути утечки L к строительной длине H изоляционной конструкции приведены в табл. 13-3.

Таблица 13-3

Коэффициент эффективности k для внешней изоляции электрооборудования распределительных устройств

L/H	1,5—2,0	2,0—2,3	2,3—2,7	2,7—3,2	3,2—3,5
k	1,0	1,10	1,20	1,30	1,40

Требования к L_0 определяются в Руководящих указаниях условием

$$L_0 \geq L_3 U,$$

где U — наибольшее рабочее междуфазное напряжение, МВ; λ_0 — удельная эффективная длина пути утечки, м/МВ, нормированные значения которой приведены в табл. 13-4.

Таблица 13-4

Нормированная удельная эффективная длина пути утечки внешней изоляции электрооборудования ОРУ 35–750 кВ (РУ Минэнерго СССР)

Степень загрязненности атмосферы	λ_0 , м/МВ (не менее) при номинальном напряжении, кВ	
	35	110–750
I	17,0	15,0
II	17,0	15,0
III	22,5	18,0
IV	26,0	22,5*
V	35,0	30,0**
VI	40,0	35,0**

* Кроме напряжения 750 кВ.

** Кроме напряжений 500 и 750 кВ.

В принятой в Руководящих указаниях классификации районов по степени загрязненности атмосферы к районам I степени относятся: лес, тундра, лесотундра, болота, луга, удаленные от промышленных и других источников загрязнения. К районам II степени принадлежат районы с сильно деформирующими почвами и земледельческие районы, в которых применяются химические удобрения, гербициды и другие химические вещества, а также промышленные районы с низким уровнем загрязненности атмосферы. Районы III–VI степеней загрязненности — это районы, имеющие источники повышенной загрязненности в виде некоторых промышленных предприятий и тепловых электростанций, участков с засоленной почвой и водоемов с засоленной водой. Правила определения степени загрязненности атмосферы с учетом названных источников и их особенностей (характер и масштабы производства, содержание водорастворимых солей в почве, площадь засоленных массивов и соленость воды в водоемах), а также расстояния от источников загрязнения до места размещения высоковольтного оборудования приведены в Руководящих указаниях.

13-2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТИПОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Общие сведения

Практически всю информацию об электрической прочности различных промежутков, составляющих внешнюю и внутреннюю изоляцию изоляторов, а также любых других высоковольтных изоляционных конструкций, до сего времени получают опытным

путем. Инженерные методы расчета пробивных напряжений разрабатываются сейчас только для газовых промежутков, физика разрядных процессов в которых изучена уже глубоко. Для внутренней изоляции, состоящей из жидких или твердых диэлектриков или их комбинации, пригодные для практики расчетные методики отсутствуют, сущность сложных процессов нарушения электрической прочности еще в должной мере не выяснена. Поэтому при проектировании изоляционных конструкций приходится пользоваться опытными данными о пробивных напряжениях. Однако получение этих данных обычно очень затруднено из-за высокой стоимости экспериментов, требующих разрушения крупных конструкций или макетов. Из-за ограниченных возможностей проведения экспериментов часто возникает необходимость использования уже имеющихся для рассматриваемого вида изоляции данных, но полученных при иных значениях основных параметров (толщине изоляции, размерах электродов). В таких случаях пользуются следующими приближенными выражениями:

при изменении площади электродов

$$\bar{U}_{пр} \approx \bar{U}_{про} - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma_0 \ln \frac{S}{S_0},$$

где S_0 — площадь электродов у конструкции, для которой имеются данные о среднем пробивном напряжении $\bar{U}_{про}$ и среднеквадратичном отклонении σ_0 ; S — площадь электродов у конструкции, для которой оценивается среднее пробивное напряжение $\bar{U}_{пр}$;

при изменении толщины d изоляции со слабеоднородным электрическим полем

$$U_{пр} \approx U_{про} \frac{d}{d_0} \frac{k_{н0}}{k_n},$$

где $k_{н0}$ — коэффициент неоднородности электрического поля (отношение наибольшей в промежутке напряженности к средней напряженности для изоляции при толщине d_0 , для которой известно пробивное напряжение $U_{про}$; k_n — коэффициент неоднородности электрического поля для изоляции при толщине d , для которой оценивается величина пробивного напряжения $U_{пр}$;

при изменении толщины d изоляции с резконеоднородным электрическим полем

$$U_{пр} \approx U_{про} \left(\frac{d}{d_0} \right)^{0,5}.$$

Следует иметь в виду, что приведенные выше соотношения не являются универсальными. Правомочность их использования необходимо проверять в каждом конкретном случае.

Электрическая прочность внутренней изоляции зависит не только от геометрических размеров, но и от ряда других факторов — режимов технологических процессов, свойств исходных материалов, условий ра-

боты или проведения опытов, методов измерения. Среди этих факторов многие являются трудноконтролируемыми, а некоторые вообще не поддаются оценке. По этой причине обычно наблюдаются большие разбросы пробивных напряжений, часто отмечаются значительные расхождения между данными для одной и той же изоляции, изготовленной на разных заводах или в разное время. В связи с этим, чтобы исключить возможность грубых ошибок, необходим и строгий анализ и отбор имеющихся опытных данных, во всех случаях требуется экспериментальная проверка вновь разработанной изоляционной конструкции.

Приводимые ниже сведения об электрической прочности изоляционных промежутков следует рассматривать как ориентировочные. Более подробные сведения имеются в рекомендуемой литературе.

Газовые промежутки

Для воздушных промежутков с однородным электрическим полем и идеально гладкими электродами пробивное напряжение, кВ, определяется выражением

$$U_{пр} = 24,5\delta l + 6,4\sqrt{\delta l},$$

где l — расстояние между электродами, см; $\delta = r_0/p_0T$ — относительная плотность воздуха; p — давление, МПа; T — температура, К; $p_0 = 0,1$ МПа; $T_0 = 293$ К.

Микронеровности на поверхности электродов приводят к снижению величины $U_{пр}$. При высокой чистоте обработки поверхностей электродов, $p \leq 0,5$ МПа и $l > 1,0$ см снижение $U_{пр}$ составляет не более 10%.

Начальное напряжение U_0 для воздушного промежутка с соосными цилиндрическими электродами идеальной гладкости равно:

$$U_0 = 24,5\delta r_0 \left[1 + \frac{0,65}{(\delta r_0)^{0,38}} \right] \ln \frac{R}{r_0},$$

где r_0 — радиус внутреннего электрода, см; R — радиус наружного электрода, см.

Для резконеоднородных электрических полей напряжение U_0 соответствует напряжению U_k зажигания короны, для слабонеоднородных полей — пробивному $U_{пр}$. Условия, при которых электрическое поле следует отнести к слабо- или резконеоднородному, рассматриваются в [13-3]. Там же излагаются методы расчета начальных и разрядных напряжений для других систем электродов и смесей газов, анализируются влияние чистоты обработки поверхностей электродов.

Пробивные напряженности, МВ/м, при частоте 50 Гц и постоянном напряжении для промежутков в виде соосных цилиндров, заполненных элегазом (SF_6 — шестифтористая сера) или азотом под давлением можно ориентировочно определить по формуле

$$E_{пр} = a(10p)^b \left(1 + \frac{1}{\sqrt{r}} \right),$$

где p — давление, МПа; r — радиус внутреннего электрода, см; $a = 2,6$, $b = 0,8$ для элегаза при $p = 0,1 \div 0,75$ МПа и $a = 2,5$, $b = 0,33$ для азота при $p > 0,5$ МПа.

Импульсная пробивная напряженность для промежутка с элегазом или азотом под давлением $E_{имп} = k_n E_{пр}$, где $E_{пр}$ — пробивная напряженность при частоте 50 Гц или

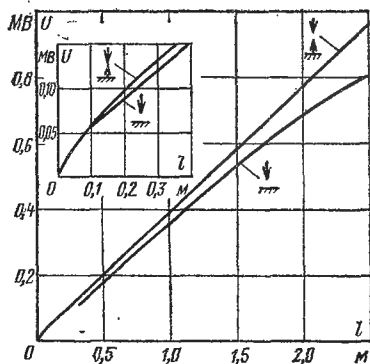
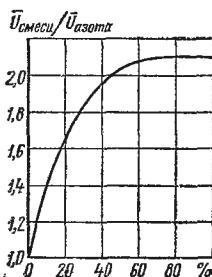


Рис. 13-2. Разрядные напряжения для воздушных промежутков стержень-стержень и стержень-плоскость при 50 Гц.

при постоянном напряжении; k_n — коэффициент импульса, который для грозовых импульсов 1,2/50 лежит в пределах 1,5—1,8, а для коммутационных импульсов — 1,05—1,10.

Зависимость относительного пробивного напряжения смеси азота и элегаза от объемного содержания элегаза показана на рис. 13-1.

Следует иметь в виду, что на пробивные напряженности газовых промежутков значительное влияние оказывают площадь электродов и чистота их обработки. Соответствующие данные для промежутков с элегазом приведены в [13-4].

Зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами для промежутков с резконеоднородным электрическим полем (стержень — стержень, стержень — плоскость) при нормальных условиях (давлении 0,1 МПа, температуре 293 К, абсолютной влажности 11 г/м³) при напря-

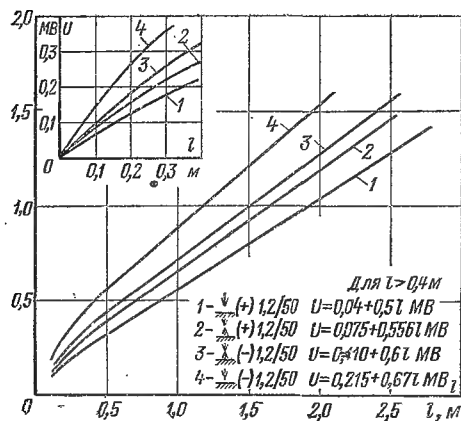


Рис. 13-3. Импульсные разрядные 50%-ные напряжения для воздушных промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость.

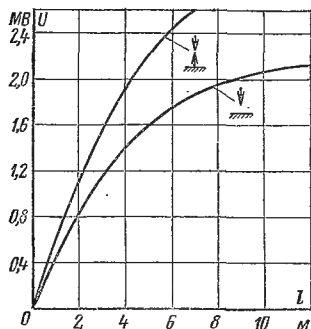


Рис. 13-4. Разрядные напряжения для воздушных промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость при 50 Гц и нормальных атмосферных условиях.

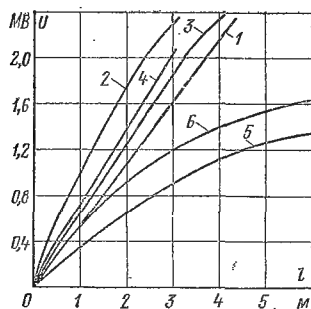


Рис. 13-5. Импульсные разрядные 50%-ные напряжения для воздушных промежутков при нормальных атмосферных условиях.
1 — импульс 1,2/50, «+ стержень — плоскость»; 2 — то же, но «- стержень — плоскость»; 3 — то же, но стержень — стержень; при положительной полярности независимости стержня; 4 — то же при отрицательной полярности; 5 — при коммутационном импульсе $\tau_{\phi} = 120 \text{ мкс}$, «+ стержень — плоскость»; 6 — то же, но при $\tau_{\phi} = 2500 \text{ мкс}$.

жениях с частотой 50 Гц и импульсных приведены на рис. 13-2—13-5. При отклонении условий от нормальных изменение разрядных напряжений учитывается с помощью поправок по ГОСТ 1516.2-76.

Разрядные характеристики встречающихся в реальных конструкциях промежутков с резконеоднородными полями лежат между характеристиками промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость.

Воздушные промежутки вдоль поверхности изолятора

Разрядные напряжения в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика зависят от степени неоднородности электрического поля, расположения поверхности относительно силовых линий поля и состояния поверхности твердого диэлектрика.

В однородном поле, когда силовые линии направлены вдоль чистой и сухой поверхности, средняя разрядная напряженность зависит от гигроскопичности диэлектрика, влажности воздуха и, особенно сильно, от плотности прилегания электродов к диэлектрику. Последнее обстоятельство

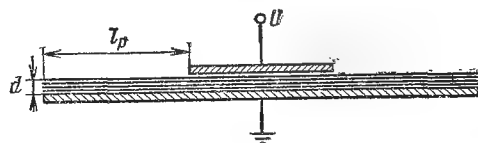


Рис. 13-6. Схема изоляции с резконеоднородным полем и преобладающей нормальной составляющей напряженности.

обусловлено тем, что в узких щелях между диэлектриком и электродом из-за различия диэлектрических проницаемостей напряженность возрастает и при относительно низких напряжениях возникают частичные разряды. Они инициируют развитие разряда по поверхности при более низких напряженностях. Разрядные напряжения могут быть в 3—6 раз ниже, чем для соответствующего чисто воздушного промежутка. Например, при нормальных условиях и расстояниях между электродами более 100 мм средняя разрядная напряженность при частоте 50 Гц по фарфору в воздухе составляет около 0,5 МВ/м.

При резконеоднородном поле с преобладающей нормальной составляющей напряженности (схема изоляции, соответствующая плоскому конденсатору, показана на рис. 13-6) при напряжении U_k в узкой области у края электрода возникает коронный разряд. Затем при $U_{ск} > U_k$ от края электрода начинают развиваться скользящие разряды, распространяющиеся на значительную часть разрядного расстояния l_p . С ростом приложенного напряжения длина $l_{ск}$ этих разрядов быстро увеличивается. При напряжении $U_{пер}$, когда $l_{ск}$ достигает l_p , происходит полное перекрытие.

Напряжения U_k и $U_{ск}$, кВ, могут быть определены по формулам

$$U_k = 1,5 \left(\frac{d}{\epsilon_r} \right)^{0,45}; \quad U_{ск} = 26,5 \left(\frac{d}{\epsilon_r} \right)^{0,45},$$

где d — толщина твердого диэлектрика, мм; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость этого диэлектрика.

Длина $l_{ск}$ скользящего разряда пропорциональна пятой степени действующего напряжения. Поэтому $U_{пер}$ мало отличается от напряжения $U_{ск}$; выражением для $U_{ск}$

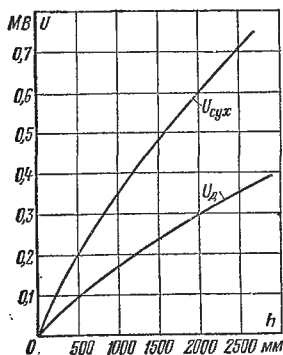


Рис. 13-7. Зависимость разрядного в сухом состоянии $U_{сух}$ и разрядного под дождем U_d напряжений вдоль гладкого без ребер фарфорового стержня от его длины h .

можно пользоваться для приближенной оценки напряжения перекрытия.

Для цилиндрического конденсатора с острыми краями электродов можно использовать приведенные выше выражения для U_k и $U_{ск}$, однако при этом вместо толщины диэлектрика d следует подставлять величину $d' = R \ln R/r$, где r — радиус внутреннего электрода, R — радиус наружного электрода. Эта формула используется для определения напряжений появления короны и скользящих разрядов у края заземленного фланца проходного изолятора.

У штыревых и стержневых опорных изоляторов электрическое поле, как правило, получается резко неоднородным с преобладающей тангенциальной составляющей напряженности. При этом разрядные напряжения зависят от конструкции металлической арматуры, формы изоляционного тела, определяющей длину пути разряда в воздухе, и состояния поверхности изолятора. При проектировании изоляторов пользуются разрядными напряжениями, измеренными при сухом состоянии поверхности и при дожде нормированной интенсивности (см. ГОСТ 1516.2-76). При сухом состоянии поверхностей измерения проводятся при напряжениях 50 Гц и импульсном, под дождем — при напряжениях 50 Гц.

Влияние смачивания чистой поверхности дождем на разрядное напряжение видно из кривых на рис. 13-7.

При расчетах фарфоровых изоляторов пользуются следующими эмпирическими формулами:

выдерживаемые напряжения, кВ, при 50 Гц в сухом состоянии для изоляторов:

$$\begin{aligned} \text{штыревых} \quad U_c &= 15 + 0,395 l_c \\ \text{стержневых} \quad U_c &= 24 + 0,378 l_c \\ \text{опорных} \quad U_c &= 30 + 0,290 l_c \\ \text{проходных} \quad U_c &= (0,33 + 0,43) l_c \end{aligned}$$

выдерживаемые напряжения 50 Гц под дождем для изоляторов:

$$\begin{aligned} \text{штыревых} \quad U_d &= 0,25 l_c \\ \text{стержневых} \quad U_d &= 0,30 l_c \\ \text{проходных} \quad U_d &= (0,23 + 0,26) l_c \end{aligned}$$

импульсные 50%-ные разрядные напряжения для изоляторов:

$$\begin{aligned} \text{однобоковых штыре-} \quad U_{50\%} &= 0,70 l_c \\ \text{вых} \\ \text{многобоковых шты-} \quad U_{50\%} &= 30 + 0,54 l_c \\ \text{ревых} \\ \text{стержневых} \quad U_{50\%} &= 0,67 l_c \\ \text{проходных} \quad U_{50\%} &= (0,52 + 0,60) l_c \end{aligned}$$

В этих выражениях для разрядных напряжений l_c — длина пути перекрытия в сухом состоянии, мм, которая ориентировочно определяется как наикратчайшее расстояние

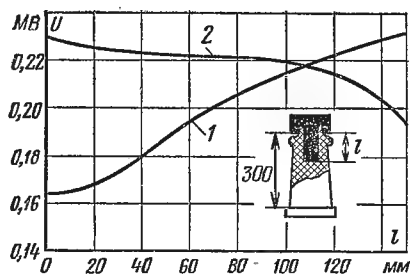


Рис. 13-8. Зависимость 50%-ного импульсного разрядного напряжения по поверхности опорного изолятора от длины l внутреннего электрода. 1 — импульс $+1,20/50$; 2 — импульс $-1,2/50$.

по воздуху между высоковольтным и заземленным электродами.

Приведенные выше выражения дают приближенные значения разрядных напряжений, так как не учитывают строго влияние формы изоляционного тела, конструкции металлической арматуры. Для иллюстрации того влияния, которое может оказывать арматура на электрическую прочность внешней изоляции изолятора, на рис. 13-8 показана зависимость импульсного 50%-ного разрядного напряжения опорного изолятора от длины внутреннего электрода.

Изоляционные промежутки в масле

Электрическая прочность промежутков в масле зависит от ряда факторов: формы и размеров электродов и промежутка, опре-

деляющих конфигурацию электрического поля и объем масла в наиболее напряженной части промежутка, формы воздействующего напряжения, степени очистки самого масла, т. е. от количества и вида содержащихся в нем загрязнений, и может зависеть от давления и температуры [13-1, 13-2].

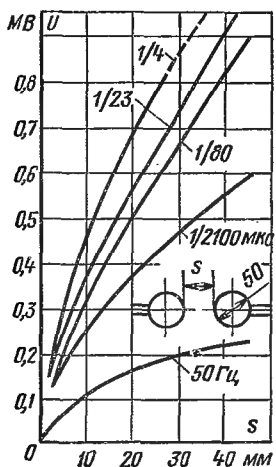


Рис. 13-9. Разрядные напряжения для трансформаторного масла при напряжении 50 Гц и импульсах разной формы в слабонеоднородном поле.

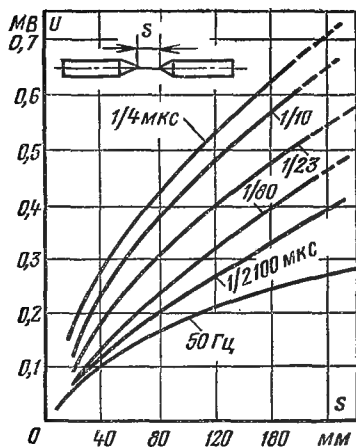


Рис. 13-10. Разрядные напряжения для трансформаторного масла при напряжении 50 Гц и импульсах разной формы в резконеоднородном поле.

Зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами в трансформаторном масле при напряжениях с частотой 50 Гц и импульсных разной формы в случае слабо- и резконеоднородных электрических полей приведены на рис. 13-9 и 13-10.

Для трансформаторного масла экспериментально установлена интересная зависимость электрической прочности от так называемого «активного» объема, т. е. от объема той части рассматриваемого промежутка, в которой напряженность равна или

больше $0,9 E_{max}$, где E_{max} — наибольшая напряженность в промежутке. Как видно из кривых на рис. 13-11 и 13-12, наибольшие в промежутке пробивные напряженности у промежутков с разными системами электродов, но с одинаковыми «активными» объемами примерно одинаковы. Эта закономерность справедлива для промежутков со слабонеоднородными полями (коэффициент неоднородности $k_n < 3,0$), ею можно поль-

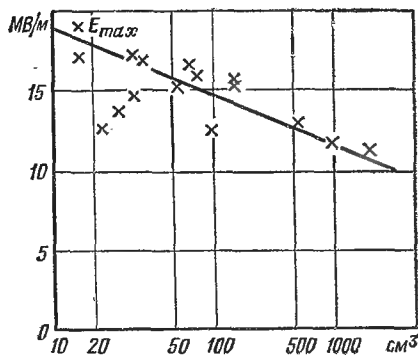


Рис. 13-11. Зависимость наибольшей в промежутке пробивной напряженности при 50 Гц от «активного» объема масла в слабонеоднородном поле. Температура масла 90°С.

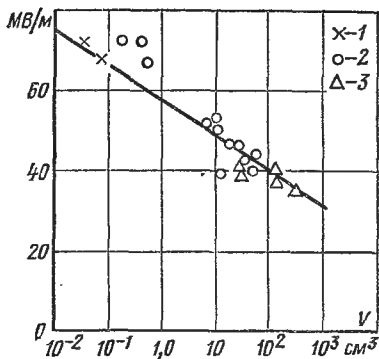


Рис. 13-12. Зависимость наибольшей в промежутке импульсной пробивной напряженности от «активного» объема масла в слабонеоднородных полях. Температура масла 90°С.

1 — сфера — плоскость; 2 — цилиндр — плоскость; 3 — соосные цилиндры.

зоваться для оценки пробивных напряжений у новых систем электродов в масле.

На электрическую прочность промежутков в масле сильное влияние могут оказывать следующие загрязнения: влага, волокна целлюлозы, особенно увлажненные, твердые проводящие и непроводящие частицы разного происхождения, растворенные газы. Подробнее о влиянии загрязнений см. [13-1 и 13-2]. Здесь лишь отметим, что загрязнения в меньшей степени влияют на пробивные напряжения при импульсах, в большей

степени — при частоте 50 Гц и постоянном напряжении. С увеличением расстояния между электродами влияние загрязнений несколько снижается.

Чисто масляные промежутки из-за сравнительно невысокой электрической прочности очень редко используются в высоковольтных аппаратах и устройствах. Обычно для повышения электрической прочности таких промежутков применяют барьеры из картона (маслобарьерная изоляция), покрытие или изолирование электродов слоями пропитанной маслом бумаги (маслонаполненная изоляция). Характеристики таких видов изоляции описаны в [13-1 и 13-2].

Промежутки в масле вдоль поверхности твердого диэлектрика

В слабонеоднородных полях, если граница раздела масло — твердый диэлектрик совпадает с силовыми линиями, наличие в промежутке твердого диэлектрика практически не влияет на разрядное напряжение. Если же граница раздела пересекает силовые линии, то влияние твердого диэлектрика может быть различным в зависимости от того, как присутствие твердого диэлектрика влияет на напряженность в той области масла, которая прилегает к поверхности твердого диэлектрика: разрядное напряжение может снизиться, остаться неизменным или даже несколько возрасти. Приближенная оценка влияния твердого диэлектрика в таких случаях может быть произведена путем анализа электрического поля, например в электролитической ванне, точная — только на основании результатов экспериментов.

В резконеоднородных полях разряд в масле по поверхности твердого диэлектрика, как и в воздухе, имеет три стадии: начальные частичные разряды малой интенсивности (корона), скользящие разряды, полное перекрытие. Для изоляции конденсаторного типа по схеме рис. 13-6 напряжение $U_{ск}$, кВ, появления скользящих разрядов по поверхности, обычно используемых в масле твердых изоляционных материалов (картона, бумаги и др.), определяется по формуле

$$U_{ск} = 13,8d^{0,45},$$

где d — толщина твердой изоляции, мм.
Длина $l_{ск}$, мм, скользящих разрядов при напряжении $U > U_{ск}$

$$l_{ск} = \frac{U - U_{ск}}{1,28},$$

где U выражено в кВ.

Полное перекрытие разрядного промежутка в масле длиной l_p происходит при напряжении

$$U_{пер} = U_{ск} + 1,28l_p,$$

где l_p выражено в миллиметрах.

Формула справедлива для $l_p > 50$ мм.

Бумажно-масляная изоляция

Бумажно-масляная изоляция (БМИ) является основной внутренней изоляцией во вводах на напряжения 110—750 кВ. Длительная и кратковременная электрическая прочность БМИ выше, чем у применявшейся ранее во вводах 110—220 кВ маслобарьерной изоляции. Вследствие этого вводы с БМИ имеют значительно меньшие радиальные размеры.

Характеристики БМИ зависят от ее структуры, т. е. от взаимного расположения лент или полос бумаг в слоях, от качества бумаги и масла, а также от технологии изготовления: плотности намотки бумажного остова, режимов вакуумной сушки и пропитки маслом. Подробные сведения о свойствах БМИ приведены в [13-6].

В вводах на напряжение 110—750 кВ непременно используется регулирование электрического поля в БМИ с помощью дополнительных электродов — алюминиевых обкладок, закладываемых в бумажных остовах при намотке. Эти обкладки образуют систему последовательно соединенных конденсаторов и разделяют БМИ на ряд относительно тонких слоев. БМИ в слое на участках, прилегающих к краям обкладок, работает в резконеоднородном поле (БМИ конденсаторного типа), в остальной части — в слабонеоднородном поле.

Для БМИ конденсаторного типа допустимые рабочие и испытательные напряжения выбираются исходя из следующих условий:

отсутствия при рабочем напряжении начальных частичных разрядов, медленно разлагающих масло и ограничивающих срок службы изоляции;

отсутствия при испытательном напряжении 50 Гц критических разрядов, способных за короткое время необратимо повредить изоляцию;

отсутствия при импульсных испытательных напряжениях пробоев или перекрытий по уступу (от края вдоль слоев бумаги) между обкладками.

При проектировании вводов для БМИ конденсаторного типа принимаются следующие средние по толщине допустимые напряженности:

испытательные импульсные 1,2/50—
 $E_{имп, доп} = 40 d^{-0,5}$ МВ/м, но не более 40 МВ/м;

испытательные при частоте 50 Гц —
 $E_{исп, доп} = 12 d^{-0,58}$ МВ/м, но не более 12 МВ/м;
рабочие — $E_{раб, доп} = 3,8 d^{-0,58}$ МВ/м, но не более 3,8 МВ/м.

Здесь d — толщина слоя БМИ между обкладками, мм.

Средние по длине уступа допустимые напряженности (вдоль слоев бумаги) принимаются равными:

Испытательные при частоте 50 Гц	0,8—1,0 МВ/м
Испытательные при импульсах 1,2/50	1,8—2,0 МВ/м
Испытательные при коммутационных импульсах	1,5—1,7 МВ/м

Электрическая прочность фарфоровых изделий

Пробивные напряженности изоляционных изделий из фарфора существенно ниже тех, которые получают при испытаниях стандартных образцов малой толщины (28—30 МВ/м). Объясняется это особенностями технологии, приводящими к увеличению неоднородности фарфора с ростом толщины стенки. При расчетах

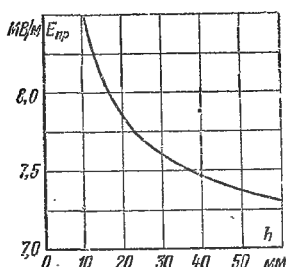


Рис. 13-13. Зависимость пробивной напряженности фарфорового цилиндра от толщины его стенки h .

изоляционных изделий в виде полых цилиндров значение пробивной напряженности, МВ/м, для высоковольтного фарфора можно определить по рис. 13-13 или по формуле

$$E_{пр} = 6,5 + 62h^{-0,5},$$

где h — толщина стенки фарфорового цилиндра, мм.

При нагреве выше 120°C электрическая прочность фарфора определяется тепловым пробоем, пробивная напряженность резко снижается с ростом температуры.

13-3. РАСЧЕТЫ ИЗОЛЯТОРОВ

Общие сведения

При проектировании изоляторов выполняют механические, электрические и тепловые расчеты с целью выбора оптимальной конструкции, удовлетворяющей всему набору требований. Для сложных изоляционных конструкций, какими являются изоляторы для высших классов напряжения, расчеты проводят для большого числа узлов и деталей, выполняющих как основные, так и вспомогательные функции в конструкции. При этом пользуются расчетными методиками и нормами, разработанными с учетом особенностей конструкции и технологии изготовления изолятора данного типа. В связи с большим разнообразием изоляционных конструкций, используемых в установках и аппаратах классов от 3 до 750 кВ, существует и много частных расчетных методик, основу которых составляют общие методы расчета электрических полей, механических напряженностей, стационарных и нестационарных процессов теплопередачи.

Многие задачи, возникающие при разработке новых изоляционных конструкций, особенно высших классов напряжения, ре-

шаются численными методами с помощью ЭВМ. К их числу относятся, например, задачи выбора оптимальных форм и размеров экранов, регулирующих электрическое поле конструкции.

Следует отметить, что неперенным и важным этапом разработки новой изоляционной конструкции является экспериментальная проверка принятых решений. Для этого опытные образцы подвергают высоковольтным и механическим испытаниям в разных условиях; образцы изоляторов наружной установки продувают в аэродинамических трубах.

Расчет электрических полей

На всех участках внешней и внутренней изоляции изоляционной конструкции должны соблюдаться условия

$$E_{раб,нб} \leq E_{раб,доп}; E_{исп,нб} \leq E_{исп,доп},$$

где $E_{раб,нб}$ и $E_{исп,нб}$ — наибольшие напряженности электрического поля при воздействии рабочего и испытательного напряжений; $E_{раб,доп}$ и $E_{исп,доп}$ — соответствующие допустимые значения напряженностей, определяемые для каждого вида изоляции по экспериментальным данным (см. § 13-2).

Расчеты электрических полей проводятся для выбора изоляционных расстояний, форм и размеров электродов, при которых, соблюдаются указанные выше условия достаточной электрической прочности и выполняются другие требования, предъявляемые ко всей конструкции в целом (механическая прочность, экономические показатели и т. д.).

Расчет электрических полей аналитическими методами возможен только в ограниченном числе случаев [13-11—13-13]. Для изоляционных конструкций с электродами сложной конфигурации наиболее эффективными являются численные методы, реализуемые с помощью ЭВМ. Эти методы можно разделить на две группы. К первой относятся численные методы решения уравнения Лапласа — метод сеток, методы Рунге и Трефтца [13-12]. Наиболее разработанным является метод сеток [13-11, 13-12], в котором решение задачи получается в виде значений потенциала в конечном числе точек рассматриваемой области при заданном распределении потенциала (или его нормальной производной) на границе этой области. Систему точек, в которых определяется потенциал, называют сеткой, а точки — узлами сетки. Дифференциальные уравнения Лапласа для узлов сетки записываются через конечные разности. Тем самым задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Метод сеток эффективен для замкнутых областей. Обычно его применяют в тех случаях, когда необходимо знать картину поля во всей рассматриваемой области.

Вторую группу численных методов, в которых решение получают в виде некоторой системы зарядов, образующих данное поле, составляют методы интегральных уравнений [13-9, 13-12]. Эти методы наиболее удобны для расчета полей изоляционных конструкций, так как они позволяют с большей точностью и при меньших затратах машинного времени вычислить значения напряженностей на поверхностях электродов, т. е. наибольшие напряженности в конструкциях.

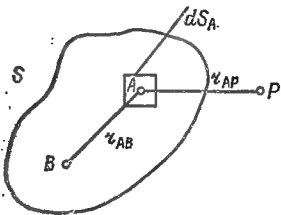


Рис. 13-14. К расчету электрического поля методом интегральных уравнений.

Чтобы пояснить сущность метода интегральных уравнений, рассмотрим следующую задачу. В однородной среде с абсолютной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_a = \epsilon_r \epsilon_0$ находится уединенный проводник (рис. 13-14). Потенциал на его поверхности равен U_0 . Потенциал в произвольной точке P вне проводника будет равен:

$$V_P = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \int_S \frac{\sigma_A dS_A}{r_{AP}}. \quad (1)$$

Если взять точку на поверхности проводника (точку B), то потенциал в ней будет удовлетворять равенству

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_a} \int_S \frac{\sigma_A dS_A}{r_{AB}} = U_0. \quad (2)$$

Уравнение (2) является интегральным уравнением I рода электростатической задачи. Для его решения необходимо найти закон распределения поверхностной плотности заряда σ по поверхности S , обеспечивающий постоянное значение потенциала во всех точках поверхности S .

Если значение поверхностной плотности заряда на проводнике определено, то вычисляется потенциал в любой точке P проводника по (1), а составляющая напряженности по произвольному направлению $\vec{n}$ равна:

$$E_{Pn} = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \int_S \frac{\sigma_A \cos(\vec{n}, \vec{r}_{AP})}{r_{AP}^2} dS_A. \quad (3)$$

На поверхности проводника напряженность электрического поля определяется поверхностной плотностью заряда:

$$E_A = \sigma_A / \epsilon_a. \quad (4)$$

Таким образом, решив уравнение (2) относительно σ , далее по формулам (1), (3) и (4) можно найти все параметры рассматриваемого электрического поля.

Численный метод решения уравнения (2) состоит в том, что оно сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных значений поверхностной плотности заряда.

Для решения уравнения (2) поверхность проводника разбивают на N площадок, внутри каждой из которых помещают расчетную точку. Поверхностная плотность заряда в k -й расчетной точке равна σ_k . Если принять, что в пределах k -й площадки $\sigma_k = \text{const}$, и вычислить потенциал в k -й расчетной точке от всех зарядов на поверхности, то получим:

$$\Phi_k = U_0 = \sum_{i=1}^N \sigma_i \alpha_{ik}, \quad (5)$$

где α_{ik} — коэффициент пропорциональности между зарядом σ_i на i -й площадке и потенциалом в k -й точке, созданным этим зарядом.

Записав уравнение (5) для всех расчетных точек поверхности, получим систему алгебраических уравнений, каждое из которых отражает тот факт, что потенциал в данной расчетной точке, созданный всеми поверхностными зарядами, равен заданному потенциалу проводника.

Составление системы уравнений, эквивалентной уравнению (2), может также производиться методом аппроксимирующих функций [13-9]. Он состоит в том, что распределение поверхностной плотности заряда описывается какой-либо функцией, например линейной или параболической. Этот метод позволяет существенно увеличить точность решения и уменьшить число расчетных точек.

Для расчета плоского или плоскомеридионального поля в однородной среде обычно достаточно число расчетных точек составляет несколько десятков.

Расчет электрического поля системы проводников при заданных потенциалах проводится путем решения системы интегральных уравнений

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \int_{S_i} \frac{\sigma_i dS_i}{r_{iB_j}} = V_j; \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Система уравнений (6) при численном решении также сводится к системе линейных алгебраических уравнений.

Численное решение систем интегральных уравнений осуществляется на ЭВМ. Схема программы приведена на рис. 13-15. Тексты программ для решения системы уравнений (6) на языке Фортран приведены в [13-10]. Погрешность расчета напряженностей не превышает 1%.

Вариантом метода интегральных уравнений для расчета поля в однородной среде является метод эквивалентных зарядов. Он состоит в том, что внутри проводника выбирается некоторая система зарядов, например точечных, кольцевых или линейных. Далее записываются условия, отражающие требования о том, что потенциал, созданный этими зарядами в конечном числе точек на поверхности проводника, равен заданному. Эти условия

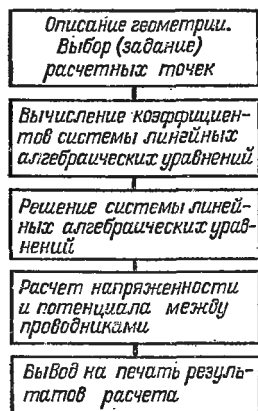


Рис. 13-15. Схема программы расчета электрического поля на ЭЕМ.

составляют систему линейных алгебраических уравнений относительно величин зарядов. Решив указанную систему уравнений и определив эквивалентные заряды, можно рассчитать потенциал и напряженность вне проводника как сумму потенциалов или напряженностей от всех зарядов.

Метод эквивалентных зарядов целесообразен в тех случаях, когда необходимо рассчитать поле относительно несложных по форме электродов или когда погрешность может быть порядка 10%.

Расчет электрических полей при наличии нескольких диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями также можно проводить, используя метод интегральных уравнений. С этой целью неоднородная среда заменяется однородной, в которой на границах раздела диэлектриков вводятся слои фиктивных зарядов. Поверхностная плотность σ_c фиктивных зарядов в произвольной точке C определяется из уравнения

$$\sigma_c = \frac{\varepsilon_{rk} - \varepsilon_{ri}}{\varepsilon_{rk} + \varepsilon_{ri}} \int_S \frac{\sigma_D \cos(\vec{DC}, \vec{n}_D)}{2\pi r_{DC}^2} dS_D = 2 \frac{\varepsilon_{rk} - \varepsilon_{ri}}{\varepsilon_{rk} + \varepsilon_{rk}} \varepsilon_0 E_{Cn}, \quad (7)$$

где ε_{rk} , ε_{ri} — относительные диэлектрические

проницаемости среды по разные стороны поверхности раздела S ; E_{Cn} — нормальная составляющая напряженности в точке C на поверхности S от всех зарядов, кроме фиктивных зарядов на этой поверхности.

Для расчета поля проводников, помещенных в неоднородную среду, составляют для поверхностей проводников уравнения (6), а для поверхностей раздела диэлектриков — уравнения (7). При этом получается смешанная система интегральных уравнений, численный метод решения которой также состоит в сведении ее к системе линейных алгебраических уравнений. Схема программы при этом имеет тот же вид, что и при расчете поля в однородной среде.

Расчет механической прочности изоляторов

Для опорных и проходных изоляторов расчет обычно ведут по условию механической прочности на изгиб: $M_{изг} < \sigma_n W$, где $M_{изг}$ — расчетный изгибающий момент, действующий на изолятор, Н·м; σ_n — разрушающее механическое напряжение на изгиб для материала изолятора, Па; W — момент сопротивления в опасном сечении, м³.

Для изолятора в виде сплошного цилиндра

$$W = \frac{\pi D^3}{32} \approx 0,1 D^3,$$

для изолятора в виде полого цилиндра

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D},$$

где D и d — наружный и внутренний диаметры тела изолятора в опасном сечении.

Сведения о механической прочности изоляционных материалов см. в § 9-11. При расчете фарфоровых изоляторов необходимо учитывать зависимость разрушающей напряженности σ_n на изгиб от площади поперечного сечения фарфора. Значения σ_n , МПа, можно определить по формулам:

Для неармированного фарфора $\sigma_n = 2,43 S^{-0,38}$

Для армированного фарфора с цементной заделкой $\sigma_n = 1,07 S^{-0,42}$

(S — площадь поперечного сечения фарфора в опасном сечении, м²).

Цель расчета — определение необходимых по условиям механической прочности изолятора размеров D и d в опасном сечении.

Расчет опорного изолятора

Задаются: номинальное напряжение U_n , расчетное механическое усилие F на изолятор, условия работы (внутренний или наружный установкой, категория исполнения).

Выбирается: конструктивная схема изолятора. Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Расчетные выдерживаемые напряжения внешней изоляции в сухом состоянии принимаются на 10—20% выше соответствующих испытательных напряжений 50 Гц и импульсных (см. табл. 13-1).

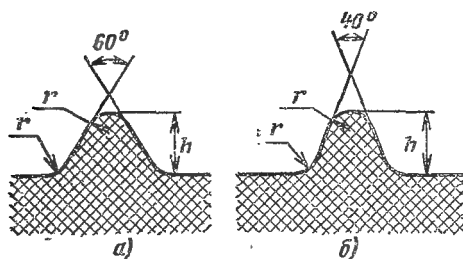


Рис. 13-16. Формы и размеры ребер для изоляторов внутренней установки.

а — $h < 20$ мм; $r = 6$ мм; б — $h > 20$ мм, $r = 10 \pm 14$ мм.

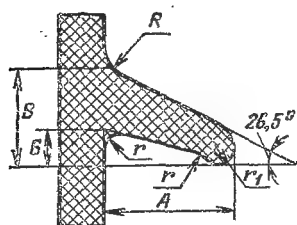


Рис. 13-17. Формы и размеры ребер для изоляторов наружной установки.

$A = 30 \div 75$ мм; $B = (0,25 \div 0,30)$ A; $B = (0,75 \div 0,85)$ A; $r = 5 \div 8$ мм; $r_1 = 10 \pm 15$ мм; $R = 15 \pm 24$ мм.

2. Определяется активная изоляционная высота $l_{\text{акт}}$ изолятора, равная полной его высоте за вычетом аксиальных размеров металлической арматуры. Величину $l_{\text{акт}}$ определяют по принятым значениям выдерживаемых напряжений в сухом состоянии и характеристикам воздушных промежутков вдоль поверхности изолятора (см. § 13-2).

3. На изоляционном теле изолятора внутренней установки предусматривают ребра по рис. 13-16: одно для напряжений 6—10 кВ в верхней части у колпачка; 2—3 для напряжений 15—20 кВ; 3—5 для 35 кВ.

У изоляторов наружной установки ребра выполняют по рис. 13-17. Число ребер, ориентировочно, $n = 1,5 + 0,060 U_n$, где U_n — номинальное напряжение, кВ. Вылет ребра A принимается равным половине промежутка между ребрами.

4. Для изоляторов наружной установки по результатам предыдущих расчетов строят очертания поверхности изоляционного тела и определяют длину l_c пути перекрытия в сухом состоянии и длину L пути утечки по поверхности. По l_c и данным, приведенным § 13-2, проверяют способность

изолятора выдержать испытательное напряжение под дождем. По L определяется удельная длина пути утечки λ , которая сравнивается с нормами (см. табл. 13-2 или 13-4). В случае необходимости увеличиваются активная высота $l_{\text{акт}}$ или размеры ребер.

5. По условиям механической прочности определяется диаметр тела изолятора. Расчетное условие:

$$k_{\text{зап}} F h \leq \frac{\sigma_n W}{3},$$

где h — высота изолятора, принимается равной $l_{\text{акт}}$; F — расчетное механическое усилие, принимается в 2—3 раза больше рабочей нагрузки изолятора; σ_n и W — расчет механической прочности изолятора; $k_{\text{зап}} = 1,05 \div 1,20$ — коэффициент запаса.

Расчет проходного изолятора

Заданы: номинальное напряжение U_n , расчетное механическое усилие F на изолятор, диаметр токоведущего стержня (по номинальному току), место установки и условия работы.

Выбирается: конструктивная схема изолятора и его внутренней изоляции.

Расчет проходного изолятора с воздушной полостью проводится в следующей последовательности.

1. По испытательным напряжениям в сухом состоянии (см. табл. 13-1) определяются расчетные значения выдерживаемых напряжений: для внешней изоляции — на 10—20% выше испытательных; для внутренней — в 1,6 раза больше, чем для внешней (см. § 13-1).

2. По выдерживаемым напряжениям для внешней изоляции определяется активная длина одного из концов изолятора (см. расчет опорного изолятора). Если оба конца изолятора работают в воздухе, длины их принимаются одинаковыми, если один из концов работает в масле, его длина определяется по выдерживаемым напряжениям и характеристикам промежутков в масле вдоль поверхности твердого диэлектрика (см. § 13-2). В последнем случае обычно длина конца изолятора в масле получается примерно в 2 раза меньшей, чем на воздухе.

На поверхности изоляционного тела предусматривают ребра (см. расчет опорного изолятора); для изолятора наружной установки проверяют разрядное напряжение под дождем и длину пути утечки по поверхности (см. расчет опорного изолятора). В случае необходимости увеличивают активную длину концов изолятора или размеры ребер.

3. По условию механической прочности определяют наружный D и внутренний d диаметры изоляционного тела (см. расчет механической прочности изолятора), при этом внутренний диаметр d принимается на 5—6 мм больше диаметра токоведущего

стержня. Толщину фарфора берут не менее 20 и не более 40 мм. В случае необходимости повысить механическую прочность увеличивают диаметр d при сохранении неизменной толщины стенки.

4. Проверяют пробивное напряжение фарфорового тела, т. е. внутренней изоляции. При этом предполагают, что воздушная полость в изоляторе полностью ионизована и все напряжение прикладывается к фарфору. Пробивное напряжение оценивается по формуле $U_{пр} = E_{пр} \frac{d}{2} \ln \frac{D}{d}$, где $E_{пр}$

для фарфора определяется с учетом толщины стенки (см. рис. 13-13). Полученное значение $U_{пр}$ должно в 1,6 раза превышать расчетное выдерживаемое напряжение 50 Гц для внешней изоляции в сухом состоянии. В случае необходимости увеличивают толщину стенки фарфора и принимают меры, исключающие возможность ионизации внутренней полости в изоляторе (заполнение полости маслом или компаундом, покрытие токоведущего стержня твердой изоляцией). В последнем случае изолятор образует двухслойный цилиндрический конденсатор, в котором на фарфор падает только часть приложенного напряжения.

5. Проверяется отсутствие коронного разряда у края заземленного фланца при наибольшем рабочем напряжении. Напряжение U_k появления короны, кВ, определяется по формуле $U_k = 1,5 \left(\frac{D}{2\epsilon_r} \ln \frac{D}{d} \right)^{0,45}$, D и d даны в миллиметрах.

Методы расчета более сложных изоляторов изложены в [13-7, 13-8].

13-4. ИЗОЛЯТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ 50 Гц

Назначение и классификация изоляторов

По условиям эксплуатации изоляторы подразделяются на конструкции для работы в помещении (для внутренней установки) и для работы в открытой атмосфере (для наружной установки).

Изоляторы для внутренней установки изготавливают в климатическом исполнении для районов умеренного (У), холодного (ХЛ) и тропического (Т) климата категорий размещения 2 и 3 по ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70, а изоляторы для наружной установки — для районов У и ХЛ категорий размещения 1 (см. разд. 6).

По назначению изоляторы подразделяются на опорные, проходные и линейные. Каждый тип изолятора имеет разновидности, отличающиеся по конструктивному исполнению, техническим характеристикам и условиям эксплуатации. Для каждого класса напряжения однотипные изоляторы изготавливают на различные механические нагрузки. Классификация изоляторов приведена в табл. 13-5.

Таблица 13-5

Классификация изоляторов

По назначению	По конструктивному исполнению	
	для внутренней установки	для наружной установки
Опорные	1. С наружной заделкой арматуры 2. С внутренней заделкой арматуры 3. С комбинированной заделкой арматуры	1. Опорно-штыревые 2. Опорно-стержневые
Проходные	Для работы в помещении	Для наружно-внутренней установки
Линейные	—	1. Штыревые 2. Тарельчатые 3. Стержневые

Приведенные ниже электрические характеристики изоляторов соответствуют их установке на высоте не более 1000 м над уровнем моря. При эксплуатации изоляторов на высоте более 1000 м и при температуре выше 40°C следует руководствоваться ГОСТ 15161-76.

Опорные изоляторы

Опорные изоляторы предназначены для изоляции и крепления токоведущих частей в электрических аппаратах и для монтажа шин распределительных устройств электрических станций и подстанций.

Опорные изоляторы для внутренней установки изготавливают по ГОСТ 15131-77Е на номинальные напряжения 6, 10, 20, 35 кВ. Минимальная механическая прочность изоляторов на изгиб (разрыв) должна соответствовать следующему ряду: 3750, 7500, 12 500, 20 000, 30 000, 42 500, 60 000 Н. Климатическое исполнение изоляторов У, ХЛ, Т, категорий размещения 2 и 3.

Изоляционная деталь изолятора с наружной заделкой арматуры (рис. 13-18) представляет собой полое тело вращения, армированное верхней и нижней арматурой. Форма верхней арматуры — колпачок изолятора — круглая. На его торцевой поверхности предусмотрены резьбовые отверстия для крепления токопроводов или деталей аппаратов. Нижняя арматура — основание изолятора, с помощью которой осуществляется его монтаж, может быть круглой, овальной или квадратной формы.

Конструкция изолятора с внутренней заделкой арматуры (рис. 13-19) отличается меньшей высотой и материалоемкостью, однако изготовить такой изолятор на большие механические нагрузки затруднительно. Поэтому перспективной является конструкция изолятора с комбинированной заделкой арматуры, в которой верхняя арматура имеет внутреннюю заделку, а ниж-

Таблица 13-6

Технические характеристики опорных изоляторов для внутренней установки

Тип изолятора	№ рисунка	Номинальное напряжение, кВ	Минимальное разрушающее усилие на изгиб, Н	Основные размеры, мм		Масса изолятора, кг	Цена, руб.
				H	D		
ИОР-6-375 У (ХЛ, Т), 2	13-19	6	3750	100	120	1,12	0,6
ИОР-6-750 У (ХЛ, Т), 2	13-19	6	7500	100	140	1,6	0,63
ИОР-10-375 У (ХЛ, Т), 2	13-19	10	3750	120	120	1,5	0,75
ИО-10-750 У, 3	13-19	10	7500	120	102	2,11	1,2
ИОР-10-750 У, ХЛ, Т, 2	13-19	10	7500	120	140	2,6	2,7
ИОР-10-1250 У, ХЛ, Т, 2	13-19	10	12 500	130	184	4,0	3,0
ИОР _{кв} -10-2000 У, ХЛ, Т, 2	13-21	10	20 000	192	190	11,6	4,5
ИО-10-2000 У, 3	13-19	10	20 000	134	160	6,3	3,1
ИО-10-3000 У, 3	13-19	10	30 000	154	180	8,1	4,2
ИО-20-375 У, 3	13-19	20	3750	210	110	4,2	1,9
ИОР-20-375 У, ХЛ, Т, 2	13-19	20	3750	212	176	5,0	2,1
ИОР-20-750 У, 3	13-19	20	7500	160	160	6,5	3,35
ИОР-20-750 У, ХЛ, Т, 2	13-19	20	7500	212	176	6,8	3,5
ИОР _{кв} -20-1250 У, ХЛ, Т, 2	13-21	20	12 500	262	180	14,8	5,9
ИОР _{кв} -20-2000 У, ХЛ, Т, 2	13-21	20	20 000	262	192	16,1	6,3
ИО-20-3000 У, 3	13-19	20	30 000	206	186	13,0	6,0
ИОР-35-375 У, ХЛ, Т, 2	13-19	35	3750	342	198	10,0	7,1
ИО-35-375 У, 3	13-19	35	3750	372	110	7,1	3,1
ИОР-35-750 У, ХЛ, Т, 2	13-19	35	7500	342	218	10,0	4,0
ИОР _{кв} -35-1250 У, ХЛ, Т, 2	13-21	35	12 500	392	187	14,0	5,5
ИОР _{кв} -35-2000 У, ХЛ, Т, 2	13-21	35	20 000	392	210	16,0	6,2

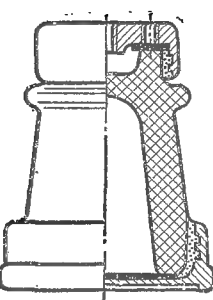


Рис. 13-18. Опорный изолятор с наружной заделкой арматуры.

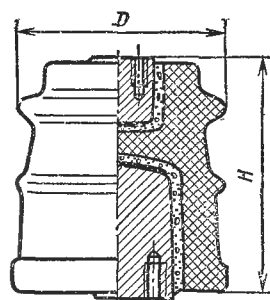


Рис. 13-19. Опорный изолятор с внутренней заделкой арматуры.

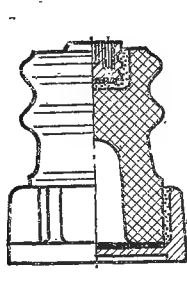


Рис. 13-20. Опорный изолятор с комбинированной заделкой арматуры.

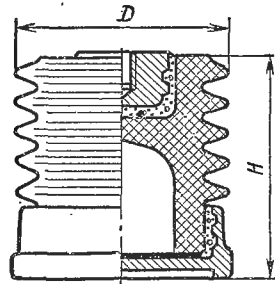


Рис. 13-21. Опорный изолятор с ребристой поверхностью и комбинированной заделкой арматуры.

Технические характеристики опорных изоляторов приведены в табл. 13-6.

В условном обозначении типов изоляторов буквы и цифры означают: И — изолятор; О — опорный; Р — ребристый; кв — с нижним квадратным основанием (ов — с овальным, кр — с круглым); первая цифра — номинальное напряжение, кВ; вторая — минимальное разрушающее усилие на изгиб, даН (1 даН=10 Н); У, ХЛ, Т — климатическое исполнение; 2, 3 — категории размещения (ГОСТ 19797-74). Срок службы изоляторов — не менее 20 лет при интенсивности отказов не более $6 \cdot 10^{-7}$ ч⁻¹.

Конструкция опорно-штыревого изолятора для наружной установки состоит из изоляционного тела, армированного верхней и нижней металлической арматурой.

Тело изолятора на напряжение 6—10 кВ выполняется одноэлементным (рис. 13-22), а на напряжение 35 кВ — двух- и даже трехэлементным (рис. 13-23). Для изготовления изоляторов на 6—10 кВ применяют электротехнический фарфор или стекло, на напряжение 35 кВ — только фарфор. Обозначение опорно-штыревых изоляторов включает в себя: О — опорный; Н — наружной установки; Ш — штыревой; первая цифра — номинальное напряжение, кВ; вторая цифра — механическая прочность на изгиб, даН. У стеклянных изоляторов после цифры добавляется буква С.

Опорно-стержневые изоляторы состоят из сплошного фарфорового стержня, армированного верхним и нижним металлическими фланцами (рис. 13-24). Опорно-стержневые изоляторы выпускают по ГОСТ 9984-72 на номинальные напряжения 10, 20, 35, 110, 150 и 220 кВ исполнения У, ХЛ, категории 1. Для изоляторов на напряжение

няя — наружную (рис. 13-20). Изоляторы с внутренней и комбинированной заделкой арматуры изготавливаются и с ребристой боковой поверхностью (рис. 13-21).

Таблица 13-7

Технические характеристики опорных изоляторов для наружной установки

Тип изолятора	Класс напряже- ния, кВ	Механиче- ская прочность на изгнб, Н	Размеры, мм			Длина пути утеч- ки, см	Масса, кг	Цена, руб.
			Высота H	Диаметры				
				D_2	D_1			

Опорно-штыревые изоляторы (рис. 13-22 и 13-23)

ОНШ-6-300	6	3675	170	—	140	19	2,5	2,3
ОНШ-6-300с	6	3430	170	—	140	19	2,4	1,1
ОНШ-10-500	10	4900	190	—	160	22,5	4,5	2,7
ОНШ-10-500с	10	4900	190	—	185	22,5	4,2	1,35
ОНШ-35-1000	35	9800	400	—	370	69	32,6	12,1
ОНШ-35-2000	35	19 600	400	—	460	86	44,6	14,4

Опорно-стержневые изоляторы (рис. 13-24)

ОНС-10-300	10	2940	175	60	120	21,5	2,7	1,55
ОНС-10-1000	10	9900	210	88	150	21,5	7,0	3,6
ОНС-20-500	20	4900	315	100	150	45	9,5	6,2
ОНС-20-2000	20	19 600	355	140	200	50	20,0	8,1
ОНС-35-500	35	4900	420	100	160	62	14,5	7,0
ОНС-35-2000	35	19 500	500	160	225	72	43,5	32,0
ОНС-35-4250	35	41 650	560	155	230	80	52,0	48,0
ОНС-110-300	110	2940	1050	125	200	168	43,0	25,7
ОНС-110-500	110	4900	1060	130	220	223	68,0	40,0
ОНС-110-1000	110	9800	1060	140	230	200	76,0	66,0
ОНС-110-2000	110	19 600	1110	145	230	200	83,0	80,0

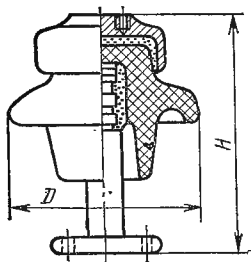


Рис. 13-22. Опорно-штыревой изолятор наружной установки на 6—10 кВ.

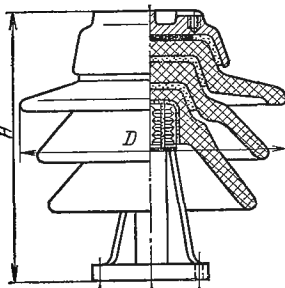


Рис. 13-23. Опорно-штыревой изолятор наружной установки на 35 кВ.

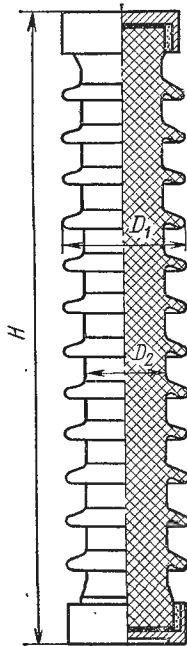


Рис. 13-24. Опорно-стержневой изолятор наружной установки на 110 кВ.

до 35 кВ включительно минимальная разрушающая нагрузка на изгиб составляет 1960, 3920, 5880, 9800, 14 700, 19 600, 29 400, 39 200 и 58 800 Н, а для изоляторов на напряжение 110 кВ и выше—12 250 и 15 680 Н.

Вероятность безотказной работы изо-

ляторов составляет при эксплуатационных испытаниях перед монтажом 0,99, а в первые три года эксплуатации—0,995.

Опорно-стержневые изоляторы обозначаются таким образом: три буквы О—опорный, Н—наружной установки, С—стержневой, далее, как и у опорно-штыревых изоляторов.

Технические характеристики опорно-штыревых и опорно-стержневых изоляторов приведены в табл. 13-7.

Проходные изоляторы

Проходные изоляторы для внутренней установки предназначены для проведения и изоляции токоведущих частей закрытых распределительных устройств электрических станций и подстанций, комплектных устройств и трансформаторных подстанций. Изоляторы изготавливают в климатических исполнениях У, ХЛ, Т, категорий размещения 2, 3 (ГОСТ 22229-76Е).

Конструкция проходного изолятора представляет собой полое цилиндрическое тело из электротехнического фарфора с ребристой наружной поверхностью, армированное металлическим фланцем. Внутри полости располагаются одна или две токоведущие шины (рис. 13-25). Промышленность выпускает проходные изоляторы на номинальное напряжение 6, 10, 20, 35 кВ и на номинальные токи 250, 400, 630, 1000, 1600, 2000, 3200, 4000, 5000, 6300, 8000, 10 000, 16 000, 20 000, 25 000 А с минимальной разрушающей нагрузкой на изгиб 3750, 7500, 12 500, 20 000, 30 000, 42 500 Н (ГОСТ 20454-75).

Изоляторы на номинальные токи 2000 А и выше с разрушающей нагрузкой 20 000 Н и более изготавливают без токоведущих частей (рис. 13-26, 13-27).

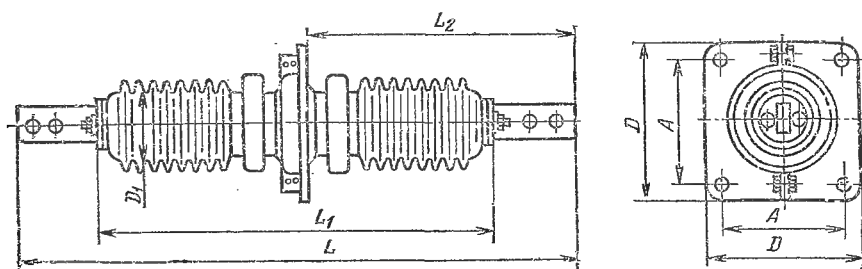


Рис. 13-25. Проходной изолятор внутренней установки с токоведущей шиной.

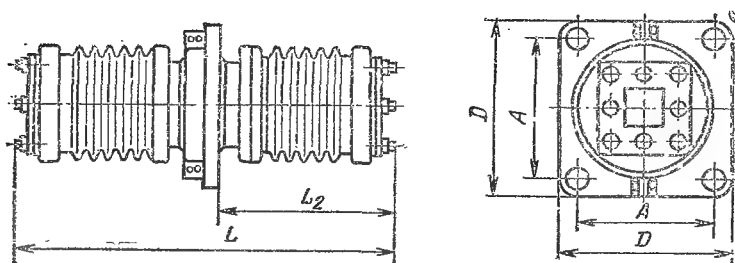


Рис. 13-26. Проходной изолятор внутренней установки, выпускаемый без токоведущей шины.

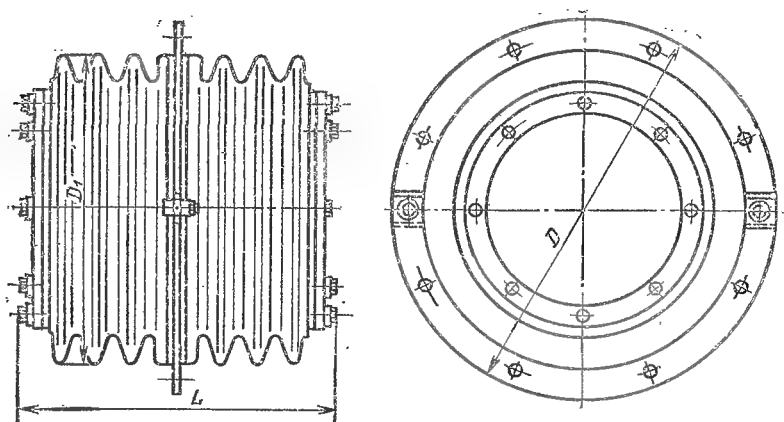


Рис. 13-27. Проходной изолятор внутренней установки на номинальные токи 10 000 и 16 000 А.

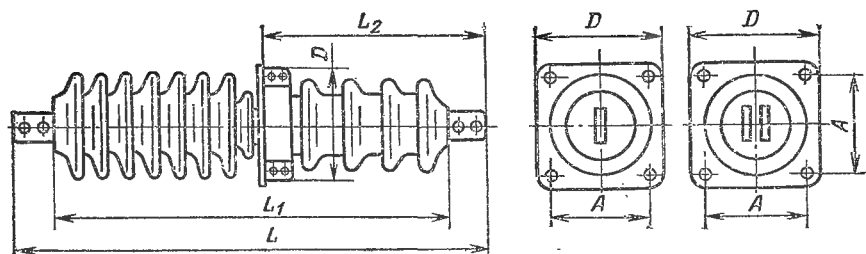


Рис. 13-28. Проходной изолятор наружно-внутренней установки с одной или двумя токоведущими шинами.

Таблица 13-8

Технические характеристики проходных изоляторов для работы в помещениях

Тип изолятора	№ рисунка	U_H , кВ	I_H , А	Минимальное разрушающее усилие на изгиб, Н	Размеры, мм					Количество шин, шт.	Масса, кг	Цена, руб.
					L	L_1	L_2	D	A			
ИП-10/1000-750 У, ХЛ, 2	13-25	10	1000	7500	520	335	278	190	150	1	7,2	5,45
ИП-10/1600-750 У, ХЛ, 2	13-25	10	1600	7500	520	335	278	190	150	2	8,0	6,25
ИП-10/1000-3000 У, 2	13-26	10	1000	30 000	518	—	245	305	260	***	32,0	16,6
ИП-10/1600-3000 У, 2	13-26	10	1600	30 000	518	—	245	305	260	***	32,0	16,6
ИП-10/2000-3000 У, 2	13-26	10	2000	30 000	518	—	245	305	260	***	32,0	16,6
ИП-10/4000-4250 У, 2	13-26	10	4000	42 500	548	—	270	305	260	***	34,5	24,0
ИП-10/8000-4250 У, 2	13-26	10	8000	42 500	640	—	322	555	495	***	69,0	68,0
ИП-10/10000-4250 У, 2	13-26	10	10000	42 500	640	—	322	555	495	***	69,0	68,0
ИП-20/1000-2000 У, ХЛ, 2	13-26	20	1000	20 000	740	—	317	322	266	***	49,0	53,0
ИП-20/2000-2000 У, ХЛ, 2	13-26	20	2000	20 000	740	—	317	322	266	***	49,0	53,0
ИП-20/3200-2000 У, ХЛ, 2	13-26	20	3200	20 000	740	—	317	322	266	***	49,0	53,0
ИП-20/10000 У, 2	13-27	20	10 000*	—	460	—	—	570	—	***	106	100
ИП-20/16000 У, 2	13-27	20	16 000*	—	460	—	—	750	—	***	121	110
ИП-35/400-750 У, ХЛ, 2	13-25	35	400	7500	910	804	420	250	200	1	30,2	20,0
ИП-35/630-750 У, ХЛ, 2	13-25	35	630	7500	950	804	440	250	200	1	31,3	21,5
ИП-35/1000-750 У, ХЛ, 2	13-25	35	1000	7500	1010	804	490	260	200	2	34,0	22,5
ИП-35/1600-750 У, ХЛ, 2	13-25	35	1600	7500	1010	804	490	260	200	2	34,5	24,0

* Не нормируется.

** Поставляется без шин.

Таблица 13-9

Технические характеристики проходных изоляторов для наружно-внутренних установок (рис. 13-28 и 13-29)

Тип изолятора	U_H , кВ	I_H , А	Минимальное разрушающее усилие на изгиб, Н	Размеры, мм					Количество шин, шт.	Масса, кг	Цена, руб.
				L	L_1	L_2	A	D			
ИП-10/630-750 У, 1	10	630	7 500	565	355	340	142	180	1	9,75	4,40
ИП-10/1000-750 У, 1	10	1000	7 500	565	355	340	142	180	2	10,0	4,65
ИП-10/630-1250 У, 1	10	630	12 500	565	360	335	158	205	1	11,0	7,50
ИП-10/1000-1250 У, 1	10	1000	12 500	565	360	335	158	205	2	11,3	16,60
ИП-10/1600-1250 У, 1	10	1600	12 500	620	375	370	205	240	3	12,0	16,60
ИП-10/2000-1250 У, 1	10	2000	12 500	640	375	380	205	240	3	12,0	16,60
ИП-10/3150-1250 У, 1	10	3150	12 500	640	375	380	205	240	3	12,0	16,60
ИП-10/630-750 У, 1	10	630	7 500	620	410	340	142	180	1	10,5	4,8
ИП-10/1000-750 У, 1	10	1000	7 500	620	410	340	142	180	2	11,0	5,0
ИП-20/2000-1250 У, 1	20	2000	12 500	886	636	468	240	270	2	34,7	22,00
ИП-20/3150-1250 У, 1	20	3150	12 500	886	636	468	240	270	3	38,0	28,0
ИП-35/400-750 У, 1	35	400	7 500	1020	850	480	200	250	1	33,9	21,00
ИП-35/630-750 У, 1	35	630	7 500	1040	850	500	200	250	1	35,7	21,5
ИП-35/1000-750 У, 1	35	1000	7 500	1080	850	515	225	260	2	38,0	29,0
ИП-35/400-750 У, 1	35	400	7 500	1050	860	490	235	260	1	38,0	29,0
ИП-35/630-750 У, 1	35	630	7 500	1090	860	510	235	260	1	38,0	29,0
ИП-35/1000-750 У, 1	35	1000	7 500	1090	860	510	235	260	2	38,3	29,0
ИП-35/1600-750 У, 1	35	1600	7 500	1090	860	510	235	300	2	38,3	31,0
ИП-10/400-750 У, 1*	10	400	7 500	560	395	276	110	215	1	10,0	4,8
ИП-10/630-750 У, 1*	10	630	7 500	580	395	296	110	215	1	10,0	4,8
ИП-10/1000-750 У, 1*	10	1000	7 500	580	395	296	110	215	2	10,5	5,0
ИП-10/2000-1250 У, 1*	10	2000	12 500	650	415	325	140	205	3	11,0	5,0

* Внутренняя часть изолятора выполнена для категории размещения 3.

Проходные изоляторы для наружно-внутренней установки предназначены для изоляции и соединения токоведущих частей закрытых распределительных устройств электрических станций и подстанций, комплектных распределительных устройств, трансформаторных подстанций с открытыми распределительными устройствами или линиями электропередачи. Изоляторы выпускают в климатических исполнениях У, ХЛ,

Т, категории размещения 1 для наружного конца и 2, 3 — для внутреннего (ГОСТ 21740-76Е).

Номинальное напряжение таких изоляторов составляет 10, 20, 35 кВ, номинальный ток 400, 630, 1000, 1600, 2000, 3150, 5000, 6300, 8000, 10 000, 16 000, 20 000, 25 000 А и минимальная разрушающая нагрузка на изгиб 7500, 12 500, 20 000, 42 500 Н. (ГОСТ 20479-75). Конструкции

таких изоляторов могут содержать одну, две (рис. 13-28) или три токоведущие шины (рис. 13-29).

На внутреннюю поверхность и поверхность, предназначенную для крепления фланца, у изоляторов на напряжение 20 и 35 кВ наносится полупроводящее или проводящее покрытие.

Срок службы изоляторов составляет 20 лет, интенсивность отказов — не более $6 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$.

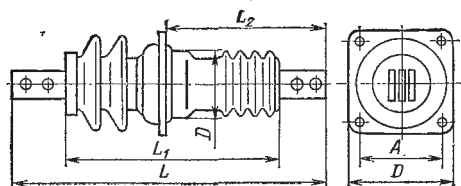


Рис. 13-29. Проходной изолятор наружно-внутренней установки с тремя шинами.

Обозначение проходных изоляторов: И — изолятор; П — проходной; числитель — номинальное напряжение, кВ; знаменатель — номинальный ток, А; следующая цифра — разрушающая нагрузка на изгиб, даН; затем даются климатическое исполнение и категория размещения.

Технические характеристики проходных изоляторов для внутренней и наружно-внутренней установки приведены в табл. 13-8 и 13-9.

Линейные изоляторы

Линейные изоляторы предназначены для изоляции и крепления проводов на воздушных линиях электропередачи и распределительных устройствах электрических станций и подстанций.

Штыревые линейные изоляторы находят применение на линиях электропередачи напряжением до 35 кВ включительно.

Климатическое исполнение изоляторов У, ХЛ, категория размещения 1.

На номинальное напряжение 6—10 кВ изоляторы изготавливают одноэлементными (рис. 13-30), а на 20—35 кВ — двухэлементными (рис. 13-31) (ГОСТ 18378-77). Одноэлементные изоляторы выпускают как из

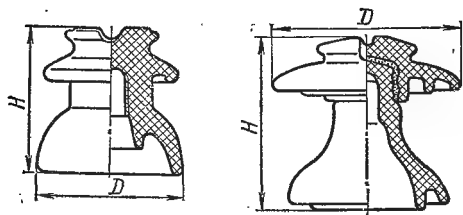


Рис. 13-30. Линейный штыревой изолятор на напряжение 6—10 кВ.

Рис. 13-31. Линейный штыревой изолятор на напряжение 20—35 кВ.

электротехнического фарфора, так и из стекла.

В условном обозначении изолятора буквы и цифры обозначают: Ш — штыревой; Ф — фарфоровый; цифра — номинальное напряжение, кВ; последняя буква — исполнение изолятора. У стеклянных изоляторов вторая буква — С.

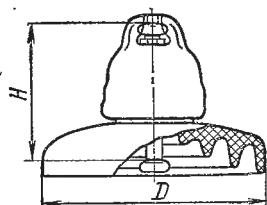


Рис. 13-32. Линейный изолятор тарельчатого типа для нормальных условий эксплуатации.

Срок службы фарфоровых изоляторов не менее 20 лет. Вероятность безотказной работы не менее 0,998 в течение каждого года работы. У стеклянных изоляторов срок службы составляет 15 лет с вероятностью безотказной работы 0,996 в течение каждо-

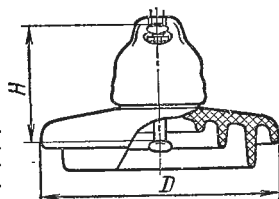


Рис. 13-33. Фарфоровый изолятор тарельчатого типа грязеустойчивого исполнения.

го года эксплуатации. Технические характеристики штыревых изоляторов приведены в табл. 13-10.

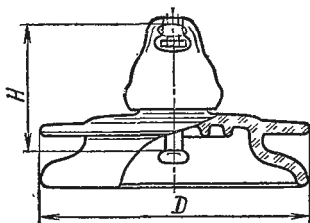


Рис. 13-34. Стеклянный изолятор тарельчатого типа грязеустойчивого исполнения.

Линейный изолятор тарельчатого типа является самой распространенной конструкцией на линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше. Для изготовления изоляционной детали изолятора используют электротехнический фарфор или закаленное стекло. Изоляторы тарельчатого типа выпускают на минимальную разрушающую нагрузку на растяжение 40 000, 70 000, 100 000, 120 000, 160 000, 210 000 и 300 000 Н, климатического исполнения У, ХЛ, категории 1. Исполнение изоляторов обозначают прописными буквами А, Б, В.

Таблица 13-10

Технические характеристики линейных штыревых изоляторов (рис. 13-30 и 13-31)

Тип изолятора	Нормиро- ванная механи- ческая нагрузка на изгиб, Н, не менее	Напряжение, кВ					Основные размеры, мм		Длина пути утечки, мм	Масса, кг	Цена, руб.
		пробив- ное*, 50 Гц	выдерживаемое			H	D				
			в сухом состоя- нии, 50 Гц	под дож- дем, 50 Гц	импульсное при волне**						
					+1,2/50 мкс			-1,2/50 мкс			
ШФ10-Г	13 000	140	63	36	95	95	140	140	265	1,8	0,94
ШФ20-В	13 000	180	82	57	125	130	184	175	385	3,5	1,68
ШФ35-Б	16 000	210	120	85	195	195	285	310	700	11,7	4,5
ШС10-А	13 750	100	55	30	90	95	110	150	210	1,4	0,45
ШС10-Г	12 250	130	55	35	80	80	120	230	265	2,2	0,70

* Пробивное напряжение линейных изоляторов штыревого и тарельчатого типов определяется в изоляционной жидкости с удельным сопротивлением 10^8 — 10^9 Ом·м.

** Импульс воздействует на токоведущий провод.

Таблица 13-11

Технические характеристики линейных изоляторов тарельчатого типа

Тип изолятора	№ рисунка	Электро-механическая разрушающая на- грузка*, Н	Напряжение, кВ					Основные размеры, мм		Длина пути утеч- ки, мм	Отношение длины пути утечки к H	Масса, кг	Цена, руб.
			пробивное, 50 Гц	выдерживаемое под дождем, 50 Гц	работоспо- собное по уров- ню радиопомех, 50 Гц	выдерживае- мое импульс- ное при волне**							
						+1,2/50 мкс	-1,2/50 мкс	H	D				
ПФ70-В	13-32	75 000	130	32	30	100	110	134	270	355	2,65	4,8	2,7
ПФ70-Б	13-33	70 000	130	40	28	115	110	120	270	375	3,0	5,0	3,0
ПФ160-А	13-32	160 000	135	40	40	105	105	173	280	385	2,15	8,7	5,1
ПФ210-А	13-32	200 000	140	44	40	115	120	194	350	420	2,16	12,85	7,0
ПС70-Д	13-32	60 000	130	30	28	85	95	130	255	295	2,2	3,4	1,8
ПС120-А	13-32	120 000	130	45	35	110	115	145	260	325	2,2	5,7	3,4
ПС160-Б	13-32	170 000	130	35	40	95	105	170	280	390	2,25	7,8	5,1
ПС300-Б	13-32	300 000	130	45	40	120	115	185	320	418	2,2	11,5	8,3
ПСГ70-А	13-34	70 000	130	40	30	120	120	130	270	400	3,0	5,2	2,5
ПСГ120-А	13-34	120 000	130	48	35	110	110	137	300	425	3,0	7,3	4,0

* Электро-механическая разрушающая нагрузка определяется при одновременном приложении к фарфоровому изолятору напряжения 50 кВ промышленной частоты (ГОСТ 6490-75), а для стеклянных — без приложения напряжения (ГОСТ 14197-77).

** Импульс воздействует на стержень изолятора.

Таблица 13-12

Технические характеристики стержневых линейных изоляторов

Тип изолятора	Электроме- ханическая раз- рушающая нагрузка при растяжении, Н	Размеры, мм			Количество ребер, шт.	Длина пути утечки, мм	Выдерживаемое напряжение, 50 Гц		Масса, кг	Цена, руб.
		H	D	D ₁			в сухом состоя- нии	под дождем		
СФ110/2.25	58 800	1270	75	150	14	2150	290	185	28,3	12,05
VKLS-75/21	117 600	1270	75	195	21	3360	355	230	39	26,0
VKLS-85/21	156 800	1310	85	205	21	3400	350	230	47	31,0

На рис. 13-32 показана конструкция фарфорового изолятора нормального исполнения (ГОСТ 6490-75).

Для линий электропередачи, расположенных в районах с загрязненной атмосферой, разработаны конструкции изолято-

ров грязеустойкого исполнения с повышенными разрядными характеристиками и увеличенной длиной пути утечки. На рис. 13-33 приведена конструкция фарфорового изолятора грязеустойкого исполнения, а на рис. 13-34 — стеклянного (ГОСТ 21799-76).

Для районов с загрязненной атмосферой весьма перспективной является конструкция стеклянного изолятора, обладающая высокими аэродинамическими свойствами (рис. 13-35). Срок службы фарфоровых изоляторов составляет 30 лет с вероятностью безотказной работы за первый год эксплуатации 0,997, в конце гарантийного срока 0,994.

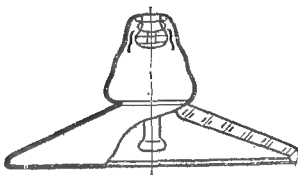


Рис. 13-35. Стеклянный изолятор тарельчатого типа с улучшенными аэродинамическими характеристиками.

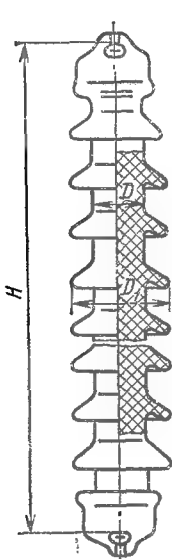


Рис. 13-36. Линейный изолятор стержневого типа на 110 кВ.

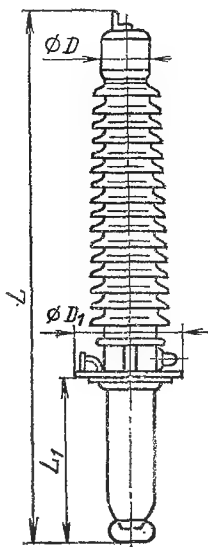


Рис. 13-37. Герметичный трансформаторный ввод с встроенным компенсатором.

стеклянных изоляторов—25 лет, при этом вероятность безотказной работы—не менее 0,997 в течение каждого года эксплуатации.

В условном обозначении изолятора буквы и цифры означают: П—подвесной; Ф (или С)—фарфоровый (или стеклянный); Г—для загрязненных районов; цифра—класс изолятора, кН, буква—исполнение изолятора.

Технические характеристики линейных изоляторов тарельчатого типа приведены в табл. 13-11.

Стержневые линейные изоляторы применяют на линиях электропередачи 110 кВ и выше. На рис. 13-36 показана конструкция стержневого изолятора типа СФ 110/2,25 на 110 кВ. В табл. 13-12 приведены технические характеристики изоля-

торов отечественного производства и изоляторов производства ГДР, поставляемых в СССР.

13-5. ВВОДЫ НА 110 кВ И ВЫШЕ

Высоковольтные вводы предназначены для ввода высокого напряжения в трансформаторы, масляные выключатели, реакторы и для прохода через стены зданий. Вводы изготовляют на классы напряжений 110, 150, 220, 330, 500, 750 кВ и номинальные токи 200, 400, 630, 1000, 1600, 2000, 3200, 4000 А с допустимыми углами наклона к вертикали 15, 20, 30, 45, 60 и 90°.

По воздействию климатических факторов по ГОСТ 15543-70 и ГОСТ 15150-69 вводы выпускают в исполнении У и ХЛ категории 1 при высоте установки над уровнем моря не выше 1000 м.

Конструкция ввода состоит из следующих основных частей: центрального стержня (трубы), изоляционного остова (внутренней изоляции), соединительной втулки и фарфоровых покрывшек.

Центральный стержень служит для соединения деталей ввода. В линейных вводах и у вводов для масляных выключателей эта труба является токоведущим элементом. В трансформаторных вводах, как правило, токоведущим элементом является проходящий внутри трубы кабель.

Изоляционный остов может быть выполнен из маслостойкой, бумажно-масляной или твердой изоляции.

Соединительная втулка служит для крепления ввода на аппарате или в проеме стен здания. Фарфоровые покрывшки являются внешней изоляцией ввода. Во вводах герметичного исполнения для компенсации температурных изменений объема масла используют компенсаторы. У негерметичных вводов для этой цели применяют маслорасширители с указателем уровня масла и гидравлическим затвором. У вводе с большим углом наклона или горизонтальной установки применяют выносной бак давления.

На рис. 13-37 приведена конструкция ввода с бумажно-масляной изоляцией. Вводы должны иметь измерительный вывод для измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости или специальный вывод у ввода с измерительным конденсатором, предназначенным для подключения приспособления для измерения напряжения (ПИН), тангенса угла диэлектрических потерь и емкости. Эти выводы могут быть использованы для измерения уровня частичных разрядов, а у вводов на напряжение 500 и 750 кВ—для подключения устройств контроля изоляции ввода (ГОСТ 10693-74).

Условное обозначение вводов: ГБМТПУ

0—45

БМ—бумажно-масляная изоляция (или МБ—маслостойкая, или ТБ—твердая бумажная); Т—для трансформаторов или реакторов (В—для выключателей, Р—для спе-

Таблица 13-13

Технические характеристики высоковольтных вводов

Тип вывода	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Размеры, мм				Характеристика температурной компенсации	Масса, кг	Цена, руб.
			L	L ₁	D	D ₁			
ГБМТ -110/630 У, ХЛ, 1 0-45	110	630	2390	663	310	350	Встроенный ком-пенсатор	136	370
ГБМТУ -110/630 У, ХЛ, 1 0-45	110	630	2490	663	310	350	То же	136	400
ГБМТ -110/2000 У, ХЛ, 1 0-90	110	2000	2540	720	416	420	» »	248	740
ГБМТУ -110/2000 У, ХЛ, 1 0-90	110	2000	2540	720	416	420	» »	278	770
ГБМТУ -150/630 У, 1 0-90	150	630	3149	848	370	350	» »	272	1000
ГБМТ -150/630 У, 1 0-45	150	630	2949	848	370	350	» »	256	960
ГБМТУ -150/2000 У, 1 0-45	150	2000	3412	994	525	420	» »	477	1550
ГБМТ -150/2000 У, 1 0-05	150	2000	3212	994	525	420	» »	420	1400
ГБМТУ -220/400 У, 1 0-45	220	400	4385	1380	300	760	Выносной давления бак	990	2000
ГБМТ -220/400 У, 1 0-45	220	400	4185	1380	300	760	То же	905	1950
ГБМТ -220/1400 У, 1 0-45	220	1400	4280	1380	300	760	» »	907	2000
ГБМТУ -220/1000 У, 1 0-90	220	1000	4690	1530	355	670	» »	840	2150
ГБМТУ -220/630 У, 1 0-90	220	630	5205	1530	440	670	» »	980	2100
ГБМТУ -220/2000 У, 1 0-90	220	2000	5205	1530	440	670	» »	980	2150
ГБМТУ -220/2000 У, ХЛ, 1 0-45	220	2000	4645	1380	560	600	Встроенный ком-пенсатор	975	2150
ГБМТ -220/2000 У, ХЛ, 1 0-45	220	2000	4635	1380	560	600	То же	883	2000
ГБМТП -330/2000 У, 1 0-45	330	2000	4975	1615	435	600	Выносной давления бак	1370	3200
ГБМТПУ -330/2000 У, 1 0-45	330	2000	5885	1615	435	600	То же	1585	3400
ГБМТ -500/1600 У, ХЛ, 1 0-30	500	1600	7300	2750	1000	1200	» »	3086	5700
ГБМТП -500/2000 У, ХЛ, 1 0-30	500	2000	7150	2600	1000	1200	» »	2955	5760
ГБМТПУ -500/2000 У, ХЛ, 1 0-30	500	2000	7150	2600	1000	1200	» »	3385	5900
ГБМТП -750/1000 У, 1 0-30	750	1000	8500	2710	1640	1200	» »	3636	7900
ГБМЛПУ -110/2000 У, 1 0-15	110	2000	3025	1130	410	550	Встроенный ком-пенсатор	266	1100
ГБМЛПУ -110/1000 У, 1 0-90	110	1000	3610	1805	275	420	Выносной давления бак	374	1100
ГБМЛ -220/1000 У, 1 0-90	220	1000	5645	3135	350	890	То же	1497	1700
ГБМР -500/320 У, 1 0	500	320	6966	2204	1000	1200	» »	3180	6800
ГБМР -750/320 У, 1 0	750	320	8400	2620	1640	1200	» »	3660	6900

Продолжение табл. 13-13

Тип ввода	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Размеры, мм				Характер температурной компенсации	Масса, кг	Цена, руб.
			L	L ₁	D	D ₁			
$\frac{\text{ГТБТ}}{0-60}$ 110/800 У, 1	110	800	2480	970	170	290	Встроенный ком-пенсатор	100	650

циальных реакторов, Л — линейный); П — ПИН; У — усиленная внешняя изоляция; 0—45 — угол наклона к вертикали; 330 — класс напряжения, кВ; 2000 — номинальный ток, А; ХЛ, 1 — исполнение и категория размещения.

Срок службы вводов не менее 25 лет. Вероятность безотказной работы в течение 5 лет равна 0,999.

В табл.13-13 приведены технические характеристики вводов.

13-6. ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Колонки из опорных изоляторов

На электрических станциях и подстанциях на более высокий класс напряжения собирают вертикальные колонки из опорных изоляторов меньшего класса напряжения. Технические характеристики колонок из различного типа приведены в табл. 13-14, из которой следует, что с увеличением числа последовательно соединенных изоляторов их механическая прочность на изгиб уменьшается [13-14]. Поэтому для обеспечения необходимой механической прочности используют вертикальные сдвоенные колонки или строенные (треноги), оси колонок которых

располагаются под некоторым углом к вертикали [13-2].

Гирлянды из линейных изоляторов

На линиях электропередачи высокого напряжения подвесные изоляторы (тарельчатого и стержневого типа) применяют в виде гирлянд, состоящих из последовательно сцепленных изоляторов. Соединение изоляторов между собой шарнирное. Во избежание самопроизвольного расцепления гирлянд стержень в пазу головки следующего изолятора фиксируется от выпадения замком. Количество изоляторов в гирлянде зависит от класса напряжения линии, материала опор, типа изоляторов и местных условий эксплуатации.

В табл. 13-15 приведены электрические характеристики гирлянд изоляторов тарельчатого типа.

Значения импульсных выдерживаемых напряжений, а также при 50 Гц приняты равными 0,8 от соответствующих величин разрядных напряжений, приведенных в [13-15].

Для обеспечения необходимой механической прочности на линиях электропередачи применяют сдвоенные или строенные гирлянды.

Таблица 13-14

Технические характеристики колонок из опорных изоляторов наружной установки

Типы изоляторов и их количество в колонке	Класс напряжения, кВ	Длина пути утечки, см	Механическая прочность на изгиб, Н	Высота колонки, см	Масса, кг
3×ОНШ-35-1000	110	210	3185	120	98
3×ОНШ-35-2000	110	258	4900	120	134
4×ОНШ-35-2000	154	360	3185	160	178
5×ОНШ-35-2000	220	450	2450	200	223
ОНС-110-500+ОНС-110-1000	220	369	2940	206	110
5×ОНС-110-500	500	1115	1470	530	340

Таблица 13-15

Электрические характеристики (кВ) гирлянд изоляторов

Тип изолятора	Полярность	Число изоляторов в гирлянде												
		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25

Линейные подвесные изоляторы

Фарфоровые

Выдерживаемое напряжение 50 Гц в сухом состоянии

ПФ70-В	48	145	240	320	385	450	510	570	625	680	740	790	840
ПФ160-А	54	175	300	380	455	535	615	685	760	815	870	940	1000
ПФ210-А	55	190	320	415	510	590	660	740	820	890	950	1030	1100

Продолжение табл. 13-15

Тип изолятора	Поляр- ность	Число изоляторов в гирлянде												
		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Выдерживаемое напряжение 50 Гц под дождем														
ПФ70-В		32	88	160	215	270	330	385	440	495	560	615	670	730
ПФ160-А		40	95	145	200	260	305	350	400	465	535	570	615	660
ПФ210-А		44	110	190	265	330	440	465	535	600	670	735	800	870

Импульсное выдерживаемое напряжение при волне 1,2/50 мкс														
ПФ70-В	+	110	220	360	500	650	800	920	1030	1150	1270	1360	1450	1550
	-	110	230	340	465	580	710	840	950	1070	1200	1310	1420	1530
ПФ160-А	+	105	270	460	650	820	980	1140	1280	1420	1530	1650	1760	1850
	-	105	265	425	580	740	900	1050	1200	1350	1500	1700	1850	2000
ПФ210-А	+	115	320	530	730	920	1050	1250	1400	1550	1680	1800	—	—
	-	120	290	480	650	840	1000	1200	1380	1550	1700	1860	—	—

Стекланные														
Выдерживаемое напряжение 50 Гц в сухом состоянии														
ПС70-Д		52	145	240	310	375	440	500	560	610	660	710	760	810
ПС120-А		56	150	255	335	400	465	520	585	640	700	760	815	865
ПС160-В		56	175	300	385	455	535	610	690	750	810	865	940	1000
ПС300-В		68	185	310	410	500	580	650	720	810	865	930	1000	1050

Выдерживаемое напряжение 50 Гц под дождем														
ПС70-Д		30	88	143	190	245	295	345	400	450	500	550	600	650
ПС120-А		45	84	135	185	225	270	320	360	405	455	500	545	590
ПС160-В		35	88	143	200	255	305	350	400	455	520	570	615	660
ПС300-В		45	96	168	220	280	335	390	450	500	560	610	680	730

Импульсное выдерживаемое напряжение при волне 1,2/50 мкс														
ПС70-Д	+	85	215	345	485	640	760	880	1000	1120	1240	1330	1430	1520
	-	95	200	320	445	575	680	810	920	1040	1150	1270	1380	1500
ПС120-А	+	110	230	375	525	680	820	960	1070	1190	1300	1410	1510	1610
	-	115	215	345	480	615	745	875	1000	1130	1240	1360	1480	1620
ПС160-В	+	95	280	455	640	820	980	1120	1270	1400	1520	1630	1750	1860
	-	105	265	425	600	740	900	1040	1200	1360	1510	1660	1810	1960
ПС300-В	+	120	310	505	700	880	1050	1210	1350	1500	1640	1790	1930	—
	-	115	280	455	625	800	960	1140	1300	1460	1610	1760	1900	—

Линейные подвесные изоляторы для районов с загрязненной атмосферой

Фарфоровые														
Выдерживаемое напряжение 50 Гц в сухом состоянии														
ПФГ70-В		65	180	310	420	520	620	700	770	840	910	980	1150	1220
Выдерживаемое напряжение 50 Гц под дождем														
ПФГ70-В		40	145	255	350	450	540	640	730	820	910	—	—	—
Импульсное выдерживаемое напряжение при волне 1,2/50 мкс														
ПФГ70-В	+	115	335	555	750	940	1120	1300	1470	1640	1810	1980	—	—
	-	110	295	490	665	850	1030	1210	1380	1560	1730	1920	—	—

Стекланные														
Выдерживаемое напряжение 50 Гц в сухом состоянии														
ПСГ70-А		60	160	240	310	390	460	540	600	660	710	760	810	860
ПСГ120-А		65	160	240	320	390	455	520	575	640	690	740	800	850
Выдерживаемое напряжение 50 Гц под дождем														
ПСГ70-А		40	120	195	255	320	385	440	500	560	630	700	760	820
ПСГ120-А		48	105	165	225	280	335	390	450	500	560	615	680	740
Импульсное выдерживаемое напряжение при волне 1,2/50 мкс														
ПСГ70-А	+	120	215	345	435	640	765	900	1000	1120	1230	1330	1440	1540
	-	120	200	320	445	575	680	810	930	1040	1160	1280	1400	1520
ПСГ120-А	+	110	225	360	520	665	810	930	1050	1170	1230	1380	1490	1590
	-	110	205	335	465	600	720	850	970	1100	1220	1340	1460	1560

Список литературы

- 13-1. Техника высоких напряжений/Под ред. Д. В. Разевига — М.: Энергия, 1976. — 488 с.
- 13-2. Техника высоких напряжений/Под ред. М. В. Костенко — М.: Высшая школа, 1973. — 528 с.
- 13-3. Разевиг Д. В., Соколова М. В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. — М.: Энергия, 1977. — 200 с.
- 13-4. ГОСТ 1516.1-76. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. ГОСТ 1516.2-76. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения 3 кВ и выше. Общие методы испытания электрической прочности изоляции. СТ СЭВ 1071-78. Электрооборудование и электроустановки. Термины, определения и общие условия испытания высоким напряжением. СТ СЭВ 1072-78. Электрооборудование и электроустановки. Методы испытания высоким напряжением.
- 13-5. Руководящие указания по выбору и эксплуатации изоляции в районах с загрязненной атмосферой. — М.: СИНТИ, 1975.
- 13-6. Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях/М. А. Грейсх, Г. С. Кучинский, Д. А. Каплан, Г. Т. Мессерман, — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 294 с.
- 13-7. Сиянский В. Н. Расчет и проектирование электрокерамических конструкций. — М.: Энергия, 1977. — 192 с.

- 13-8. Афанасьев В. В., Адоньев Н. М., Карпенко Л. Н. Электрические аппараты высокого напряжения. Атлас конструкций. — Л.: Энергия, 1977. — 184 с.
- 13-9. Колечицкий Е. С. Анализ и расчет электрических полей. — Ч. I и II. — М.: МЭИ, 1977.
- 13-10. Колечицкий Е. С., Филиппов А. А. Методические указания к практическим занятиям и расчетам по курсу «Анализ и расчет электрических полей». — М.: МЭИ, 1978.
- 13-11. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. — М.: Энергия, 1968. — 488 с.
- 13-12. Методы расчета электростатических полей/Н. Н. Мироплюбов и др. — М.: Высшая школа, 1963. — 415 с.
- 13-13. Резвыш К. А. Расчет электростатических полей. — М.: Энергия, 1967. — 120 с.
- 13-14. Абрамов В. Д., Хомяков М. В. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения. — М.: Энергия, 1976. — 264 с.
- 13-15. Изоляторы высоковольтные и низковольтные. Арматура воздушных линий электропередачи. Ч. I. Изоляторы высоковольтные и низковольтные. — М.: Информэнерго, 1976. — 36 с.
- 13-16. ГОСТ 15144-69. Изоляторы. Термины и обозначения (см. также СТ СЭВ 1134-78).
- 13-17. Цимберов А. И., Штерн А. В. Стекло-линные изоляторы. — М.: Энергия, 1973. — 200 с.
- 13-18. Цимберов А. И. Линейные изоляторы. — М.: Энергия, 1976. — 88 с.

Раздел 14

КАБЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

14-1. Классификация кабельных изделий	422
14-2. Конструкция и маркировка силовых кабелей	422
14-3. Электрические характеристики силовых кабелей	430
14-4. Способы прокладки силовых кабелей	432
14-5. Допустимые токи нагрузки	437
14-6. Арматура силовых кабелей	445
14-7. Контрольные кабели и кабели управления	454
14-8. Силовые и установочные провода и соединительные шнуры	458

14-9. Монтажные кабели и провода	464
14-10. Обмоточные эмалированные провода	469
14-11. Обмоточные провода с эмалев-волоконистой, бумажной и пленочной изоляцией	472
14-12. Провода со стекловолоконистой изоляцией	474
14-13. Прочие типы обмоточных проводов	475
14-14. Цены на кабельные изделия	477
Список литературы	480

14-1. КЛАССИФИКАЦИЯ
КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Кабельная промышленность выпускает свыше 1000 конструкций и марок кабельных изделий. В настоящем справочнике приведены только основные сведения об этих изделиях. Более подробную информацию можно получить из списка прилагаемой литературы [14-1—14-16] и соответствующих стандартов и технических условий.

Общая классификация кабельных изделий:

1. Неизолированные провода для воздушных линий электропередачи (см. § 12-13).
2. Силовые кабели,

3. Группа кабелей и проводов с пластмассовой и резиновой изоляцией.

4. Кабели связи.

5. Обмоточные и монтажные провода.

Кроме того, в число кабельных изделий можно включить кабельную арматуру.

14-2. КОНСТРУКЦИЯ И МАРКИРОВКА
СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Конструкции силовых кабелей на напряжения 1—35 кВ изображены на рис. 14-1—14-3. Жилы выполняются многопроволочными и однопроволочными. У однопроволочных жил в маркировке кабеля дополняется обозначение «ож».

Кабели с изоляцией из бумажных лент, пропитанных маслोकанифольным составом, изготавливаются в соответствии с ГОСТ 18410-73. При напряжениях 1, 3, 6 и 10 кВ

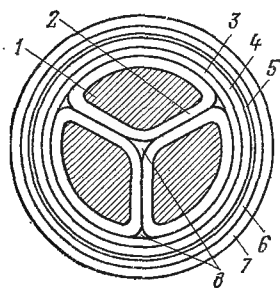


Рис. 14-1. Кабель с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 1—10 кВ.

1 — медная или алюминиевая токопроводящая жила; 2 — фазная изоляция; 3 — поясная изоляция; 4 — свинцовая или алюминиевая оболочка; 5 — подушка под броней; 6 — броня; 7 — защитные покрытия; 8 — заполнение.

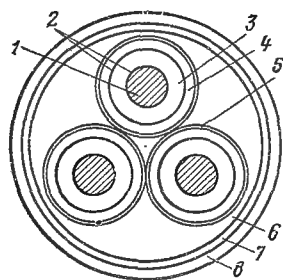


Рис. 14-2. Кабель на напряжение 20 и 35 кВ.

1 — токопроводящая жила; 2 — полупроводящие экраны; 3 — изоляция; 4 — свинцовая оболочка; 5 — подушка; 6 — заполнение; 7 — броня; 8 — защитные покрытия.

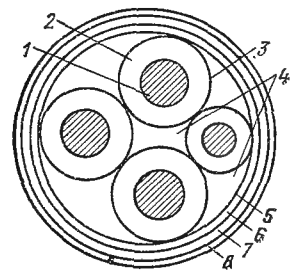


Рис. 14-3. Кабель с резиновой изоляцией.

1 — токопроводящая жила; 2 — изоляция; 3 — обмотка прорезиненной лентой; 4 — заполнение; 5 — обмотка прорезиненной лентой; 6 — оболочка; 7 — броня; 8 — защитные покрытия.

конструкции кабелей соответствуют рис. 14-1, а при напряжении 20 и 35 кВ — рис. 14-2. При прокладке кабелей на вертикальных и крутонаклонных трассах возможно

перемещение пропитывающего состава вдоль кабеля. Поэтому для таких трасс изготавливаются кабели с объединенно-пропитанной изоляцией (ГОСТ 18410-73) и с нестекающим пропитывающим составом (ГОСТ 18409-73).

Кабели с резиновой изоляцией изготавливаются в соответствии с ГОСТ 433-73 (рис. 14-3).

Кабели с пластмассовой изоляцией изготавливаются: на напряжение 0,66—3 кВ — в соответствии с ГОСТ 16442-70, на напряжение 6 кВ — в соответствии с ТУ 16.505.685-75 и на напряжение 10 кВ — в соответствии с ТУМИ 344-74. Кабели с полиэтиленовой изоляцией могут изготавливаться также на напряжение 35 кВ.

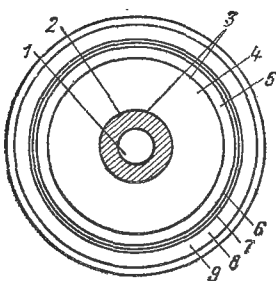


Рис. 14-4. Кабель с бумажной пропитанной изоляцией (маслонаполненный) на напряжение 110 и 220 кВ.

1 — маслопроводящий канал; 2 — полая токопроводящая жила, скрученная из фазонных луженых проводов; 3 — экран из двух-трех лент полупроводящей бумаги; 4 — изоляция; 5 — металлическая оболочка; 6 — подушка из поливинилхлоридных лент; 7 — медные усиливающие ленты; 8 — броня; 9 — защитные покрытия.

Конструкция кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение до 6 кВ соответствует рис. 14-3, но в ней отсутствует скрепляющая лента 3, а на напряжение 10 и 35 кВ — рис. 14-2, в которой 4 — оболочка из поливинилхлоридного пластика, под которую прокладывается дополнительный экран из медных лент.

Для открытой прокладки плотной группой рекомендованы кабели марок ВБВ и АВБВ (ГОСТ 5.1596-72 и ТУ 16.505-836-78). Эти кабели имеют дополнительный сердечник между жилами из поливинилхлорида, шланговую оболочку, броню из стальных лент и дополнительную оболочку из поливинилхлорида поверх брони. Сечения и количество жил для этих кабелей приведены в табл. 14-1. Рабочее напряжение 660 В при частоте 50 Гц или постоянное 1000 В.

Конструкция кабелей на напряжения 110 и 220 кВ изображена на рис. 14-4 (ГОСТ 16441-78). Эти кабели изготавливаются с изоляцией из бумажных лент различной плотности, пропитанных высоковольтным нефтяным или синтетическим маслом малой вязкости. Маслопроводящий канал

Таблица 14-1

Сечение и число жил кабелей марок ВБВ
и АБВВ

Параметр	ВБВ		АБВВ	
Число жил	2	3 и 4	2	3 и 4
Сечение, мм ²	1,5—50	1,5—95	2,5—50	2,5—120

этих кабелей через специальные муфты периодически по трассе прокладки соединяется с баками давления, которое может достигать 0,3 МПа.

Кабели на напряжение 110—525 кВ прокладываются также в трубопроводе с маслом под избыточным давлением (ГОСТ 16441-78). Каждая из трех фаз такого кабеля снаружи имеет экран из медных лент. На такой кабель предварительно накладывается свинцовая оболочка, которая непосредственно перед прокладкой в металлический трубопровод удаляется. Внутренний диаметр трубопровода соответствует 2,85 диаметра отдельной фазы. Давление масла достигает 1,5 МПа. К месту прокладки кабель может доставляться также без оболочки в специальном контейнере.

Буквенные обозначения в маркировке кабелей приведены в табл. 14-2. Они определяются конструкцией брони и защитных покровов.

Так, марка СБ обозначает кабель с бумажной пропитанной изоляцией с медными жилами в свинцовой оболочке (С), с броней из стальных лент (Б) с защитными покровами из кабельной пряжи, пропитанной битумом; СБГ — то же, но без защитных покровов («голый»); СГ — то же, но без брони и защитных покровов; АСБ — то же, что СБ, но с алюминиевой жилой; ААБ — то же, но с алюминиевой оболочкой (А вместо С).

Марка ОСБ — кабель с отдельно освинцованными жилами (рис. 14-2) с броней из стальных лент с защитными покровами.

Марка ААШв — кабель с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке и защитным покровом в виде шланга из поливинилхлорида.

Марка ААБв — кабель с выпрессованной оболочкой из поливинилхлорида (в) под броней из стальных лент (Б) с защитными покровами.

Марка ВВБ — кабель с изоляцией из поливинилхлорида, оболочкой из поливинилхлорида с броней из стальных лент и защитными покровами.

Марка ПВБ — то же, но с изоляцией из термопластичного полиэтилена.

Марка ПсВБГ — то же, но с изоляцией из самозатухающего полиэтилена без защитных покровов.

Марка ПОВБ — кабель с полиэтиленовой изоляцией, фазы которого заключены в отдельные экраны из медных лент и поливинилхлоридные оболочки в общей ленточной броне, с защитными покровами.

Таблица 14-2

Буква или сочетание букв	Значение буквы или сочетания букв
А	Алюминиевая жила
АС	Алюминиевая жила и свинцовая оболочка
АА	Алюминиевая жила и алюминиевая оболочка
Б	Броня из двух стальных лент с антикоррозионным защитным покровом
Бн	То же, но с негорючим защитным покровом (не поддерживающим горение)
Г	Отсутствие защитных покровов поверх брони или оболочки
л(2л)	В поддушке под броней имеется слой (два слоя) из пластмассовых лент
в(н)	В поддушке под броней имеется выпрессованный шланг из поливинилхлорида (полиэтилена)
Шв(Шн)	Защитный покров в виде выпрессованного шланга (оболочки) из поливинилхлорида (полиэтилена)
К	Броня из круглых оцинкованных стальных проволок, поверх которых наложен защитный покров
н	Не поддерживающий горение защитный покров
П	Броня из оцинкованных плоских проволок, поверх которых наложен защитный покров
С	Свинцовая оболочка
О	Отдельные оболочки поверх каждой фазы
В—в конце обозначения через черточку	Обеденно-пропитанная бумажная изоляция
Ц	Бумажная изоляция, пропитанная нестекающим составом, содержащим церезин
НР	Резиновая изоляция и оболочка из резины, не поддерживающей горение
В	Изоляция или оболочка из поливинилхлорида
П	Изоляция или оболочка из термопластичного полиэтилена
Нс	Изоляция или оболочка из самозатухающего полиэтилена (неподдерживающего горение)
Бб	Броня из профилированной стальной ленты

Бронепокровы, выполненные из двух стальных лент, применяются при отсутствии значительных растягивающих усилий для всех видов прокладки, кроме прокладки в воде.

Круглые стальные оцинкованные проволоки диаметром 4—6 мм применяются при прокладке в воде.

Плоские стальные оцинкованные проволоки толщиной 1,5—1,7 мм применяются при прокладке в земле или в воздухе при наличии значительных растягивающих усилий.

Подушка под броней выполняется в виде слоя кабельной пряжи, пропитанной битумом. В кабелях с алюминиевой оболочкой применяется дополнительная подмотка одной лентой из поливинилхлоридного пластика. При прокладке в агрессивных (коррозионноактивных) грунтах применяется подмотка из двух лент. Усиление подушки

Таблица 14-3

Номенклатура силовых кабелей

Обозначение марок	Число жил	Номинальное напряжение кабелей, кВ					
		1	3	6	10	20	35
		Номинальное сечение жил, мм ²					
ААГ, АСГ, СГ, ААШв, ААШп	1	10—800	10—625	—	—	25—400	120—300
ААБлГ, ААБл, ААБ2л, ААБ2лШв, ААБ2лШп, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБ2л, СБ2л, АСБн, СБн, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ	1	10—800	10—625	—	—	—	—
ААПл, ААП2л, ААПлГ, АСП, СП, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, ААПлШв	1	50—800	35—625	—	—	—	—
ААШв-В, ААП2лШв-В, ААБл-В, ААБ2л-В, АСБ-В, АСБн-В, АСБлн-В, АСБ2л-В, СБ2л-В, СБ-В, СБл-В, СБн-В, АСБл-В	1	10—500	—	—	—	—	—
АСБГ-В, СБГ-В	1	10—625	—	—	—	—	—
АСБ2лГ-В, СБ2лГ-В	1	—	240—625	—	—	—	—
ААПл-В, ААПлГ-В, АСП-В, СП-В, АСПл-В, СПл-В, АСП2л-В, СП2л-В, АСПлн-В, СПлн-В, АСПГ-В, СПГ-В	1	50—500	35—500	—	—	—	—
АСП2лГ-В, СП2лГ-В	1	—	240—625	—	—	—	—
АСКл, СКл, ЦААШв, ЦСШв, ЦАСШв	1	—	—	—	—	—	120—300
ААБл, ААБл-В, АСБ, СБ, АСБ-В, СБ-В, АСБл, СБл, АСБл-В, СБл-В, АСП2л, СП2л, АСПл, СПл, СКл, АСКл	1*—основная и 2—контрольные	240—800 +2×1	—	—	—	—	—
АСГ, СГ, АСБ, СБ, АСБл, СБл, СБ2л, АСБ2л, АСБн, СБн, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ	2	6—150	—	—	—	—	—
АСП, СП, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПР, СПГ	2	25—150	—	—	—	—	—
АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБн-В, АСБлн-В, СБлн-В, АСБГ-В, СБГ-В, АСБ2л-В, СБ2л-В	2	6—120	—	—	—	—	—
АСП-В, СП-В, АСПл-В, СПл-В, СПГ-В, АСПГ-В, АСП2л-В, СП2л-В	2	25—120	—	—	—	—	—
ААГ, ААШв, ААШп, ААБл, ААБ2лШв, ААБ2лШп, ААБлГ, ААБ2л, АСГ, СГ, АСШв, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБн, СБн, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ, АСБ2л, СБ2л, АСБ2лШв, СБ2лШв, АСБ2лГ, СБ2лГ	3	6—240	6—240	10—240	16—240	—	—
СШв, СБШв	3	16—240	—	10—240	16—240	—	—
ААПл, ААП2л, ААПлГ, ААП2лГ, ААП2лШв, АСП, СП, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, АСКл, СКл, АСП2лГ, СП2лГ	3	25—240	25—240	16—240	16—240	—	—
СПШв	3	25—240	—	16—240	16—240	—	—
АОАБ, ОАБ, АОАБ2л, ОАБ2л, АОАБ2лГ, ОАБ2лГ, АОСБ, ОСБ, АОСБл, ОСБл, АОСБн, ОСБн, АОСБГ, ОСБГ, АОАШвБ, ОАШвБ	3	—	—	—	—	25—185	120—150
АОСК, ОСК	3	—	—	—	—	25—185	120
ААШв-В, ААП2лШв-В, ААБл-В, ААБ2л-В, АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБн-В, ААГ-В, АСБлн-В, СБлн-В, АСБГ-В, СБГ-В, АСБ2л-В, СБ2л-В, ААШп-В	3	6—120	6—120	16—120	—	—	—

* Для сетей электрифицированного транспорта.

Продолжение табл. 14-3

Обозначение марок	Число жил	Номинальное напряжение кабелей, кВ					
		1	3	6	10	20	35
		Номинальное сечение жил, мм ²					
ААБВ, ААБВГ	3	—	—	10—240	16—240	—	—
ААШВ-В, ААБГЛ-В, АСБГ-В, СБГ-В	3	185—240	—	—	—	—	—
ААПЛ-В, ААПЛГ-В, АСП-В, СП-В, АСПЛ-В, АСПЛн-В, СПЛн-В, АСП2л-В, СП2л-В	3	25—150	25—150	16—120	—	—	—
АСПГ-В, СПГ-В, АСП2л-В, СП2лГ-В	3	185—240	—	—	—	—	—
ЦААБЛ, ЦААБ2л, ЦААБШВ, ЦААБШП, ЦААБЛГ, ЦААБЛн, ЦААПЛ, ЦААП2л, ЦААПЛГ, ЦААПЛн, ЦААПЛШВ, ЦААШВ, ЦАСБ, ЦСБ, ЦАСГ, ЦСВГ, ЦАСБн, ЦСБн, ЦСПВ, ЦАСШВ, ЦАСБШВ, ЦСПШВ, ЦСБШн, ЦАСП, ЦАСПл, ЦСБл, ЦСП, ЦАСПГ, ЦСПГ, ЦАСПн, ЦСПн, ЦАСПШВ, ЦАСПл, ЦСПл, ЦАСКл, ЦСКл, ЦААБВ, ЦААБВГ	3	—	—	25—185	25—185	—	—
ЦАОСБ, ЦОСБ, ЦАОСБл, ЦОСБл, ЦАОСБГ, ЦОСВГ, ЦОАБ, ЦАОАБ2л, ЦОАБ2л, ЦАОАБ2лГ, ЦОАБ2лГ, ЦОАБ	3	—	—	—	—	—	120—150

Таблица 14-4

Таблица 14-6

Четырехжильные силовые кабели на напряжение 1 кВ

Число жил и сечения кабелей с резиновой изоляцией

Обозначение марок	Сечение жил, мм ²
ААГ, ААШП, ААШВ, ААБЛГ, ААП2лШВ, ААБЛ, ААБ2л, АСГ, СГ, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБн, СБн, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ, АСБ2л, СБ2л, АСШВ, СШВ, СБШВ	10—185*
ААПл, ААП2л, ААПЛГ, АСП, СП, АСПл, СПл, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, АСП2л, СПШВ	16—185*
АСКл, СКл	25—185*
ААШВ-В, ААП2лШВ-В, ААБЛ-В, ААБ2л-В, АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБн-В, АСБлн-В, АСБ2л-В, СБ2л-В	10—120
ААБЛГ-В	16—120
АСБГ-В, СБГ-В	10—185
ААПл-В, ААПЛГ-В, СП-В, АСП-В, АСПл-В, СПл-В, АСПлн-В, СПлн-В, АСПГ-В, СПГ-В, АСП2л-В, СП2л-В	16—120

* Жилы одинакового сечения до 120 мм² включительно.

Таблица 14-5

Сечение нулевой жилы для конструкций с уменьшенным сечением этой жилы в четырехжильных кабелях

Сечение основных жил, мм ²	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185
Сечение нулевой жилы, мм ²	6	10	16	16	25	25	35	35	50	50

Марка кабеля	Число основных жил	Номинальное напряжение кабеля, В			
		переменное 660 (постоян- ное 1000) В	постоянное		
			3000	6000	10 000
			Номинальное сечение жил, мм ²		
СРГ	1	1—240	1,5—500	2,5—500	240—400
АСРГ	1	4—300	4—500	4—500	240—400
СРГ	2 и 3	1—185	—	—	—
АСРГ	2	4—240	—	—	—
АСРГ	3	2,5—240	—	—	—
ВРГ, НРГ	1—3	1—240	—	—	—
АВРГ, АНРГ	1	4—300	—	—	—
То же	2 и 3	2,5—300	—	—	—
СРБГ, АСРБГ	1	—	240, 400, 500	—	—
СРБГ, АСРБГ	1	—	—	95, 240 400, 500	—
СРБ, СРБГ, ВРБн, ВРБ, ВРБГ, НРБ, НРБГ	2 и 3	2,5—185	—	—	—
АСРБ, АСРБГ, АВРБ, АВРБн, АВРБГ, АНРБ, АНРБГ	2	4—240	—	—	—
	3	2,5—240	—	—	—

Примечание. Двух- и трехжильные кабели могут быть изготовлены с дополнительной заземляющей или нулевой жилой.

Таблица 14-7

Основные марки и параметры одножильных маслонаполненных кабелей 110, 150, 220, 380 и 525 кВ с медными токопроводящими жилами

Марка	Характеристика конструкции и производственное назначение	Напряже-ние, кВ	Изготавливается серийно с сечением жилы, мм ²
Маслонаполненные низкого давления с центральным маслопроводящим каналом			
МНАШв (МНАгШв)	В гладкой или гофрированной алюминиевой оболочке, в шланге из поливинилхлоридного пластика, предназначенный для прокладки в туннелях и каналах зданий	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
МНАШву (МНАгШву)	В гладкой (или гофрированной) алюминиевой оболочке в шланге из поливинилхлоридного пластика с усиленным защитным слоем под шлангом, предназначенный для прокладки в земле (в траншеях), если кабель не подвергается растягивающим усилиям и защищен от механических повреждений во время прокладки и в эксплуатации, например прокладка в железобетонных лотках	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
МНС	В свинцовой оболочке с упрочняющим покровом и с защитным покровом из лент поливинилхлоридного пластика, предназначенный для прокладки в туннелях и каналах зданий	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		150	240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		220	300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
МНСА	В свинцовой оболочке с упрочняющим покровом и с защитным покровом из слоев битумного состава, полиэтилентерефталатных (или резиновых) лент и пропитанной кабельной пряжи (или стеклопружи), предназначенный для прокладки в земле (в траншеях), если кабель не подвергается растягивающим усилиям и защищен от механических повреждений	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		150	240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		220	300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
МНСК	В свинцовой оболочке с упрочняющим покровом, с подушкой, с броней из круглых стальных оцинкованных проволок, с наружным покровом из слоев битумного состава, полиэтилентерефталатных лент (или резиновых лент) и пропитанной кабельной пряжи (или стеклопружи), предназначенный для прокладки под водой, где требуется дополнительная механическая защита кабеля	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		150	240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		220	300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
МНСШв	В свинцовой оболочке с упрочняющим покровом, в шланге из поливинилхлоридного пластика, предназначенный для прокладки в земле (в траншеях), если кабель не подвергался растягивающим усилиям и защищен от механических повреждений, а также в туннелях и каналах зданий	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		150	240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		220	300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
Маслонаполненные высокого давления в трубопроводе			
МВДТ	Во временной свинцовой оболочке, снимаемой на месте прокладки при протягивании в трубопровод, предназначенный для эксплуатации в стальном трубопроводе с маслом под давлением, прокладываемый в туннелях, в земле и под водой	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, 400, 500, (550), 625, (700)
		220	300, 400, 500, (550), 625, (700)
		330	400, 500, (550), 625, (700)
		380	400, 500, (550), 625, (700)
		500	(550), 625, 700
МВДТк	В контейнере с маслом, предназначенный для эксплуатации в стальном трубопроводе с маслом под давлением, прокладываемый в туннелях, в земле и под водой	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, 400, 500, (550), 625, 700
		220	300, 400, 500, (550), 625, (700)
		330	400, 500, (550), 625, (700)
		380	400, 500, (550), 625, (700)
		500	(550), 625, (700)

Примечания: 1. Кабели, имеющие сечения, указанные в скобках, должны изготавливаться по согласованию между потребителем и предприятием-изготовителем.

2. К марке кабеля, пролитанного синтетическим маслом, добавляется буква «с».

Таблица 14-8

Размеры и максимальные строительные длины трехжильных кабелей с отдельно
освинцованными жилами

Сечение жилы, мм ²	Наружный диаметр, мм				Строительная длина, м	
	20 кВ		35 кВ		20 кВ	35 кВ
	ОСБ	ОСК	ОСБ	ОСК		
25	64	79	—	—	400	—
35	67	81	—	—	350	—
50	71	85	—	—	325	—
70	74	89	92	106	300	300
95	78	93	96	111	250	250
120	87	92	91	106	250	250
150	80	96	94	—	250	250
185	85	100	—	—	250	—

Таблица 14-9

Размеры и максимальные строительные длины трехжильных кабелей с поясной изоляцией
в свинцовой оболочке

Сечение жилы, мм ²	Наружный диаметр, мм												Строительная длина, м		
	1 кВ				6 кВ				10 кВ				1 кВ	6 кВ	10 кВ
	СГ	СБ	СБГ	СК	СГ	СБ	СБГ	СК	СГ	СБ	СБГ	СК			
6	12	20	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	—	—
10	14	23	20	—	21	30	27	—	—	—	—	—	750	650	—
16	16	25	22	—	24	33	30	41	28	37	34	45	750	600	500
25	17	26	23	34	24	33	30	41	29	38	35	45	750	600	500
35	19	28	25	36	26	35	32	43	31	40	37	48	600	500	375
50	22	31	28	39	29	38	35	46	33	42	39	50	600	500	375
70	25	34	31	42	32	41	38	49	36	45	42	53	600	500	375
95	29	38	35	45	35	44	41	52	39	48	45	57	500	375	350
120	32	41	38	50	38	47	44	55	42	51	48	60	350	300	325
150	36	45	42	53	42	51	48	59	46	55	52	63	380	300	325
185	39	48	45	56	45	54	51	62	49	58	55	70	300	250	250
240	44	53	50	61	49	58	55	71	54	64	61	75	300	250	250

Таблица 14-10

Наружные диаметры, мм, трехжильных кабелей
на 660 В с резиновой изоляцией для неподвижной
прокладки

Сечение жилы, мм ²	СРГ	СРБ	ВРГ, НРГ
1	9	17	11
1,5	10	18	12
2,5	11	18	13
4	12	19	14
6	13	20	15
10	18	26	20

Продолжение табл. 14-10

Сечение жилы, мм ²	СРГ	СРБ	ВРГ, НРГ
16	20	28	22
25	24	34	27
35	26	37	29
50	31	41	34
70	34	45	39
95	40	50	44
120	43	54	47
150	47	58	52
185	52	63	57

Таблица 14-11

Основные геометрические размеры и массы маслонаполненных кабелей среднего давления
с центральным маслопроводящим каналом и медной жилой на напряжение 110 кВ

Параметры кабеля	В алюминиевой оболочке				В свинцовой оболочке								
	МНШву				МНСшв			МНСК			МНСА		
Сечение токопроводящей жилы, мм ²	150	185	240	270	150	270	625	150	270	625	150	270	625
Диаметр маслопроводящего канала, мм	12	12	12	12	12,4	13,4	14,5	12,4	13,4	14,5	12,4	13,4	14,5
Внешний диаметр кабеля, мм	58,2	58,8	60,6	60,6	59,4	60,7	70,5	73,8	84,5	94,1	61,6	62,9	72,5
Масса масла в кабеле, кг/км	600	630	670	670	694	709	890	694	709	890	694	709	890
Масса кабеля, т/км	5,2	5,7	6,4	6,7	10,4	11,8	17,7	19,6	21,0	28,2	10,5	12,2	17,7

Таблица 14-12

Основные геометрические размеры и массы маслонаполненных кабелей среднего давления с центральным маслопроводящим каналом и медной жилой на напряжение 220 кВ в свинцовой оболочке

Параметры кабеля	МНСШв			МНСК			МНСА		
Сечение токопроводящей жилы, мм	350	500	625	350	500	625	350	500	625
Диаметр маслопроводящего канала, мм	12,4	14,5	14,5	12,4	14,5	14,5	12,4	14,5	14,5
Внешний диаметр кабеля, мм	84,3	86,8	88,4	107,5	110	112	85,9	88,4	90,0
Масса масла в кабеле, кг/км	1610	1690	1690	1610	1690	1690	1610	1690	1690
Масса кабеля, т/км	19,4	21,4	23,6	31,7	33,6	36,4	19,4	21,4	23,6

Таблица 14-13

Основные геометрические параметры и массы маслонаполненных кабелей марки МВДТ с медной жилой во временной свинцовой оболочке

Параметры кабеля	110 кВ			220 кВ			380 кВ	525 кВ
Сечение жилы, мм ²	270	425	700	300	550	700	550	625
Диаметр, мм:								
по временной свинцовой оболочке	56,5	60,8	67,7	79,3	82,1	84,9	97,4	107,4
по полукруглым проволокам	49,3	53,6	60,5	70,7	73,5	76,5	90,2	100,2
Масса, т/км:								
в свинцовой оболочке	10,1	13,1	17,0	17,9	20,6	22,7	25,3	29,6
при снятой свинцовой оболочке	4,4	7,0	10,0	8,5	11,0	12,6	13	15,6
Внутренний диаметр стального трубопровода, мм	150	150	199	199	199	199	253	253

Таблица 14-14

Характеристики силовых кабелей с резиновой изоляцией (в марке буква Р) с медными или алюминиевыми жилами (в марке буква А) в свинцовой оболочке из поливинилхлоридного пластика (в марке буква В) или в резиновой маслостойкой оболочке, не распространяющей горения (в марке буква Н)

Марка кабеля	Характеристика конструкции и преимущественное назначение
СРГ, АСРГ	В свинцовой оболочке голый. Для прокладки внутри помещений, в каналах, туннелях, в местах, не подверженных вибрации, при отсутствии механических воздействий в среде, нейтральной по отношению к свинцу
НРГ, АВРГ	В резиновой маслостойкой оболочке, не распространяющей горение. Для прокладки внутри помещений, в каналах, туннелях, при отсутствии механических воздействий на кабель
ВРГ, АВРГ	В поливинилхлоридной оболочке. Та же область применения, но при наличии агрессивных сред (кислот, щелочей)
СРБ, АСРБ, ВРБ, АВРБ, НРБ, АНРБ	В свинцовой, или поливинилхлоридной, или в резиновой маслостойкой оболочке, не распространяющей горение, бронированный двумя стальными лентами. Для прокладки в земле (траншеях), если кабель не подвергается значительным растягивающим усилиям
СРБГ, АСРБГ, ВРБГ, АВРБГ, НРБГ, АНРБГ	В свинцовой, или поливинилхлоридной, или в резиновой маслостойкой оболочке, не распространяющей горение, бронированный двумя стальными лентами с противокоррозионной защитой. Прокладка внутри помещений, в каналах, туннелях, если кабель не подвергается значительным усилиям
ВРБн, АВРБн	В поливинилхлоридной оболочке, бронированный двумя стальными лентами, поверх которых наложен покров, не распространяющий горение. Для прокладки в земле (траншеях), если кабель не подвергается значительным растягивающим усилиям и когда требуется стойкость к распространению горения

Таблица 14-15

Характеристика некоторых конструкций кабелей с пластмассовой изоляцией на переменное напряжение до 3 кВ (или постоянное 7,5 кВ) с медными или алюминиевыми жилами

Марка кабеля	Число жил	Номинальное сечение основных жил при номинальном напряжении, кВ					
		0,66		1,0		3,0	
		Медные жилы	Алюминиевые жилы	Медные жилы	Алюминиевые жилы	Медные жилы	Алюминиевые жилы
ВВГ, АВВГ, ПВГ, АПВГ, ПсВГ, АПсВГ	1, 2, 3 4 5	1,5—50 2,5—50 —	2,5—50 2,5—50 —	1,5—240 2,5—185 1,5—25	2,5—240 2,5—135 1,5—25	4—240 — —	4—240 — —
ВВБ, АВВБ, ПВБ, АПВБ	1, 2 и 3* 4	1,5—50 2,5—50	2,5—50 2,5—50	1,5—240 2,5—185	2,5—240 2,5—240	4—240 —	4—240 —
АВАШв (АПашв)	3	—	—	—	4—185	—	4—185
ВВБГ, АВВБГ	1, 2 и 3*	1,5—50	2,5—50	1,5—240	2,5—240	4—240	4—240

* Сечение медных жил двух- и трехжильных кабелей 2,5 мм² и более.

может производиться выпрессованием оболочки из поливинилхлорида или полиэтилена.

Нормальный защитный антикоррозионный покров состоит из слоя битума и кабельной пряжи, пропитанной битумом и противогнилостными составами, и покрытия, предохраняющего витки кабеля на барабанах от ссыхания.

Негорючий наружный покров состоит из поливинилхлоридной оболочки или стеклянной пряжи, пропитанной негорючим составом. При высокой коррозионной активности грунта предусмотрен защитный покров в виде поливинилхлоридного шланга (или самозатухающего полиэтилена). Наружный покров состоит из битумного состава, пластмассовой ленты и шланга.

Ассортимент изготавливаемых кабелей приведен в табл. 14-3—14-7.

Наружные диаметры кабелей приведены в табл. 14-8—14-15. Кабели с алюминиевыми жилами и оболочками и кабели с медными жилами и свинцовыми оболочками имеют практически одинаковые наружные диаметры. Наружный диаметр четырехжильных кабелей на напряжение 1 кВ на 1—4 мм больше, чем у трехжильных.

Размеры кабелей с объединенно-пропитанной изоляцией на напряжение 6 кВ близки к размерам обычных кабелей на напряжение 10 кВ.

14-3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Электрическое сопротивление токопроводящей жилы постоянному току при температуре T , °С, Ом/км,

$$R_t = \frac{\rho_{20}}{q} [1 + \alpha (T - 20)],$$

где q — номинальное сечение жилы, мм²; ρ_{20} — удельное сопротивление при 20°С, нОм·м; и α — температурный коэффициент сопротивления, равный для меди и алюминия приблизительно 0,004°С⁻¹.

С учетом скрутки и нагартовки проводок в жиле ρ_{20} не должно превышать для меди и алюминия: при сечении жил до 500 мм² — 17,76 и 29,11 нОм·м, при сечении жил свыше 500 мм² — 17,93 и 29,4 нОм·м.

При расчете сопротивления жилы переменному току сопротивление жилы постоянному току следует умножить на коэффициент, приведенный в табл. 14-16 для меди. Для алюминиевых жил этот коэффициент несколько меньше. Для уменьшения сопротивления жил переменному току при больших сечениях жилы сечений 625 мм² и более изготавливаются секционированными.

Таблица 14-16

Значение коэффициента возрастания сопротивления при переменном токе для медных жил

Сечение жилы, мм ²	Трехжильные кабели с поясной изоляцией	Три одножильных кабеля, расположенных вилотупую по вершинам треугольника
150	1,01	1,006
185	1,02	1,008
240	1,035	1,0105
300	1,052	1,025
400	1,095	1,05
500	1,15	1,08
625	—	1,125
800	—	1,20
1000	—	1,29

Индуктивность кабеля при симметричной нагрузке фаз в трехфазной системе при расположении жил по углам равностороннего треугольника может быть вычислена по формуле, мГн/км,

$$L=L_1+A\lg\frac{s}{r},$$

где s — расстояние между центрами жил; r — радиус круглой токопроводящей жилы, а для кабелей с секторными жилами — радиус круглой жилы, эквивалентной по сечению секторной (приближенно); $A=0,463$ и $0,471$ для одно- и трехжильных (с секторными жилами) кабелей соответственно.

Значения коэффициентов L_1 приведены в табл. 14-17. Значения активного и индуктивного сопротивлений кабелей с поясной изоляцией на напряжение 6 и 10 кВ приведены в табл. 14-18.

Таблица 14-17

Коэффициент L_1 для расчета индуктивности кабелей

Число проволок в жиле	Одножильные кабели	Трехжильные кабели
3	0,0750	0,0766
7	0,0638	0,0650
10	0,0556	0,0567
37	0,0531	0,0543
61	0,0525	0,0535
Более 61	0,0502	0,0513

Емкость кабеля с экранированными фазами или с отдельно свинцованными жилами, Ф/м, вычисляется по формуле

$$C=\frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln R/r},$$

где R — радиус по изоляции; $\epsilon_0=8,85\times 10^{-12}$ Ф/м; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции (для бумажной изоляции $\epsilon_r\approx 3,5\div 3,7$).

Емкостный ток в трехфазном кабеле

Рабочая емкость C_p , мкФ/км, трехжильных кабелей с поясной изоляцией в трехфазных цепях с симметричным напряжением

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм²										
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
1	0,35	0,4	0,5	0,53	0,63	0,72	0,77	0,81	0,86	0,87	—
6	0,2	0,23	0,28	0,31	0,36	0,4	0,42	0,46	0,51	0,53	0,58
10	—	—	0,28	0,27	0,29	0,31	0,35	0,37	0,44	0,45	0,46

Таблица 14-20

Емкость, мкФ/км, одножильных кабелей и фазы трехжильных кабелей с отдельно свинцованными жилами с бумажной пропитанной изоляцией

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм ²										
	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
20	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,32	0,35	0,38	0,42	0,46	0,51
35	—	—	—	0,18	0,20	0,24	0,26	0,28	0,31	0,33	—

Таблица 14-18

Активное и индуктивное сопротивления трехжильных кабелей с поясной изоляцией

Сечение, мм ²	Активное сопротивление, Ом/км, при 20°C		Индуктивное сопротивление, Ом/км, при напряжении	
	Алюминий	Медь	6 кВ	10 кВ
1,5	19,62	11,95	—	—
2,5	11,75	7,17	—	—
4	7,85	4,5	—	—
6	4,90	3,0	—	—
10	2,94	1,79	0,11	0,122
16	1,84	1,12	0,102	0,113
25	1,17	0,716	0,091	0,099
35	0,84	0,514	0,087	0,095
50	0,589	0,359	0,083	0,090
70	0,42	0,256	0,08	0,086
95	0,31	0,189	0,078	0,083
120	0,245	0,15	0,076	0,081
150	0,196	0,12	0,074	0,079
185	0,159	0,097	0,073	0,077
240	0,125	0,075	0,071	0,075

при симметричном напряжении определяется емкостью C_p :

$$I_C=\frac{U_H}{\sqrt{3}}\omega C_p l,$$

где U_H — номинальное линейное напряжение; ω — угловая частота (314 рад/с); l — длина линии.

Для кабелей, изготавливаемых по ГОСТ 18410-73, справедливы приближенные соотношения $C_1=0,865 C_p$; $C_2=1,68 C_p$, где C_1 — емкость одной жилы по отношению к двум другим, соединенным с металлической оболочкой; C_2 — емкость трех жил, соединенных вместе, по отношению к свинцовой оболочке.

Ток замыкания на землю при заземлении одной фазы кабельной сети в системе с изолированной нейтралью

$$I_B\approx\sqrt{3}U_H\omega 0,56C_p l.$$

Значения емкостей для различных конструкций кабеля с бумажной пропитанной изоляцией приведены в табл. 14-19—14-21.

Таблица 14-21

Емкость фазы маслонаполненных кабелей

Тип кабеля	Напря- жение, кВ	Сечение, мм ²	Толщина изоляции, мм	Емкость, мкФ/км
Маслона- полненный центральный маслопроводя- щим каналом	с	110	150	0,25
			270	0,33
			625	0,45
	220	350	20,0	0,22
			500	0,27
			625	0,28
Маслонапол- ненный для затя- гивания в сталь- ной трубопровод	110	270	10,7	0,30
			425	0,37
			700	0,46
	220	350	10,0	0,37
			500	0,46
			625	0,46

Тип кабеля	Напряже- ние, кВ	Сечение, мм ²	Толщина изоляции, мм	Емкость, мкФ/км
Маслонапол- ненный для затя- гивания в сталь- ной трубопровод	220	300 550 700	20,7 18,1 17,5	0,20 0,28 0,29
			26	0,21
			30	0,19
	380	550	26	0,21
			30	0,19
			30	0,19

14-4. СПОСОБЫ ПРОКЛАДКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Основные марки силовых кабелей на напряжение 1—35 кВ и области их применения приведены в табл. 14-22—14-24.

Области применения силовых кабелей различных конструкций устанавливаются в зависимости от агрессивности и пожароопасности окружающей среды, механических условий при монтаже и эксплуатации. При определении областей применения кабелей учтены требования Правил устройства электроустановок (ПУЭ), Строительных норм и правил (СНиП).

В табл. 14-22—14-24 приведены базовые марки силовых кабелей с алюминиевыми жилами. Применение кабелей с медными жилами предусмотрено только для специальных целей, например во взрывоопасных помещениях, в шахтах, опасных по газу и пыли. Предусматривается также широкое использование кабелей в алюминиевой оболочке и кабелей с пластмассовой изоляцией взамен кабелей в свинцовой оболочке. Применение кабелей в свинцовой оболочке предусмотрено лишь для подводной прокладки, прокладки в угольных и сланцевых шахтах, в особо опасных коррозионноактивных средах. В остальных случаях выбор кабелей в свинцовой оболочке подлежит специальному техническому обоснованию.

С целью обоснования выбора марок кабелей должна быть определена коррозионная активность среды по трассе прокладки кабелей. Оценку коррозионной активности грунтов, грунтовых, речных и озерных вод по отношению к алюминиевым оболочкам кабелей проводят по удельному электрическому сопротивлению (табл. 14-25) и по данным химического анализа проб (табл. 14-26, 14-27). При этом степень активности грунтов и вод устанавливают по показателю, характеризующему наибольшую активность в соответствии с табл. 14-25—14-27. Коррозионная активность среды при прокладке кабелей с алюминиевыми оболочками в тун-

нелях, каналах, блоках и трубах, в которые возможен доступ грунтовых вод, устанавливается по агрессивности вод. Методы определения показателей активности сред определены в ГОСТ 9.015-74 «Единая система защиты от коррозии и старения. Подземные сооружения. Общие технические требования».

При выборе марки кабеля следует учитывать сложность трассы, по которой он должен быть проложен, а также способ прокладки. В зависимости от конфигурации кабельные трассы подразделяются на сложные и простые. При прокладке в земле к сложным участкам трассы, на которых прокладывается одна строительная длина кабеля, относятся:

а) участки трасс с более чем четырьмя поворотами под углом свыше 30°;

б) прямолинейные участки трасс с более чем четырьмя переходами в трубах длиной более 20 м или более чем двумя переходами в трубах длиной более 40 м.

При прокладке в зданиях к сложным участкам, на которых прокладывается одна строительная длина кабеля, относятся прокладки в трубах с поворотами с их числом более двух при длине труб более 20 м, а также с числом протяжек через огнестойкие перегородки или аналогичные препятствия более четырех, не считая вводов кабелей к электрооборудованию. На указанных сложных участках кабельных трасс, где при прокладочно-монтажных или ремонтно-эксплуатационных работах возникает опасность повреждения защитного поливинилхлоридного шланга, применение кабелей марки ААШв не рекомендуется. В этих случаях на отдельных сложных участках трассы рекомендуется применение других марок кабелей или должны быть применены специальные меры, исключающие повреждение поливинилхлоридного шланга.

Значительные растягивающие усилия могут возникать в процессе эксплуатации при прокладке кабелей в насыпных, болотистых и многолетнемерзлых грунтах и в

Таблица 14-22

Марки кабелей, рекомендуемых для прокладки в земле (траншеях)

Область применения	Кабель прокладывается на трассе	Тип и марки кабелей		
		с бумажной пропитанной изоляцией		с пластмассовой и резиновой изоляцией и оболочкой
		В процессе эксплуатации не подвергается растягивающим усилиям	В процессе эксплуатации подвергается значительным растягивающим усилиям	В процессе эксплуатации не подвергается растягивающим усилиям
В земле (траншеях) с низкой коррозионной активностью	Без блуждающих токов С наличием блуждающих токов	ААШв, ААШп, АЛБл, АСБ ААШв, ААШп, ААБ2л, АСБ	ААПл, АСПл ААП2л, АСПл	АВВГ ¹ , АПсВГ ¹ , АПвВГ ¹ , АПВГ ¹ , АВВБ, АПВБ, АПсВБ, АППБ, АПвВБ, АПБ6Шв, АПвБ6Шв, АВВБ6Шп, АПсБ6Шв, АПАШв, АПАШп, АВАШв, АПсАШв, АВРБ, АНРБ, АВАБл, АПАБл
В земле (траншеях) со средней коррозионной активностью	Без блуждающих токов С наличием блуждающих токов	ААШв, ААШп, ААБл, ААБ2л, АСБ, АСБл ААШп, ААШв, ААБ2л, ААБв, АСБл, АСБ2л	ААПл, АСПл ААП2л, АСПл	
В земле (траншеях) с высокой коррозионной активностью	Без блуждающих токов С наличием блуждающих токов	ААШп, ААШв, ААБ2л, АСП2л, ААП2лШв, ААБ2лШв, ААБ2лШп, ААБв, АСБл, АСБ2л ААШп, ААБв, АСБ2л, АСБ2лШв	ААП2лШв, АСП2л	

Примечание. ¹ Кабели на номинальное напряжение до 1,0 кВ включительно. Кабели с пластмассовой изоляцией в алюминиевой оболочке не следует применять на трассах с наличием блуждающих токов в грунтах с высокой коррозионной активностью.

Таблица 14-23

Марки кабелей, рекомендуемых для прокладки в воздухе

Область применения	С бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке		С пластмассовой и резиновой изоляцией и оболочкой	
	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации
Прокладка в помещениях (туннелях), в каналах, кабельных полустажах, шахтах, коллекторах, производственных помещениях и др.: а) сухих б) сырых, частично затапливаемых при наличии среды со слабой коррозионной активностью в) сырых, частично затапливаемых при наличии среды со средней и высокой коррозионной стойкостью	ААГ, ААШв ААШв ААШв, АСШв	ААБлГ ААБлГ ААБвГ, ААБ2лШв, ААБлГ, АСБлГ, АСБ2лГ, АСБ2лШв ¹	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АПвВГ ¹ , АПВГ ¹ , АПсВГ, АПсВГ ¹	АВВБГ, АВРБГ, АВБ6Шв, АПвВБГ ¹ , АПАШв, АВАШв, АПвБ6Шп ¹ , АПсБ6Шв, АПсВБГ, АПВБГ ¹ , АНРБГ
Прокладка в пожароопасных помещениях	ААГ, ААШв	ААБвГ, ААБлГ, АСБлГ	АВВГ, АВРГ, АПсВГ, АНРГ, АСРГ, АПсВГ ¹	АВВБГ, АВБ6Г, АВБ6Шв, АПсБ6Шв, АПсВБГ, АВРБГ, АСРБГ

Продолжение табл. 14-23

Область применения	С бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке		С пластмассовой и резиновой изоляцией в оболочке	
	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации
Прокладка во взрывоопасных зонах классов: а) В-I, В-Iа	СБГ, СБШв, ААШв	—	ВВГ ² , ВРГ ² , НРГ ² , СРГ ²	ВБВ, ВВБГ, СРБГ, ВБШв, НРБГ
б) В-Iг, В-II	ААБЛг, АСБГ, ААШв	—	АВВГ, АВРГ, АНРГ	АВБВ, АВБШв, АВВБГ, АВВГ, АНРБГ, АСРБГ, АВРБГ
в) В-Iб, В-IIа	ААГ, АСГ, АСШв, ААШв	ААБЛГ, АСБГ	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АСРГ	
Прокладка на эстакадах: а) технологических	ААШв	ААБЛг, ААБвГ ² , ААБШв, АСБЛГ	—	АВВБГ, АВВБГ, АВРБГ, АНРБГ, АПсВБГ, АПсСВГ, АВАШв
б) специальных ка- бельных в) по мостам	ААШв, ААБЛГ, ААБвГ, АСБЛГ, ААШв ²	ААБЛГ	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АПсВГ, АПсБГ, АПсСВГ, АВ, АПАШв	АВВБГ, АВВБГ, АВРБГ, АНРБГ, АВАШв, АПсВБГ, АПсБГ
Прокладка в блоках	СГ, АСГ		АВВГ, АПсВГ, АПсБГ, АПсГ	

¹ Для одиночных кабельных линий, прокладываемых в помещениях.

² Для групповых осветительных сетей во взрывоопасных зонах класса В-Ia.

⁸ Применяются при наличии химически активной среды.

4 Кабель марки АСБ2Шв может быть использован в исключительно редких случаях с особым согласованием.

⁵ Прокладка в коробах или при обеспечении защиты от механических повреждений в эксплуатации.

Таблица 14-24

Марки кабелей, рекомендуемые для прокладки в воде и шахтах

Условия проклад-ки	С бумажно-пропитанной изоляцией в металлической оболочке			Условия проклад-ки	С бумажно-пропитанной изоляцией в металлической оболочке		
	в отсутствие опасности ме-ханических повреждений эксплуатации	в процессе эксплуатации не подверга-ются значи-тельным растягивающим усилиям	в процессе эксплуатации подвергаются значитель-ным растяги-вающим уси-лиям		в отсутствие опасности ме-ханических повреждений эксплуатации	в процессе эксплуатации не подверга-ются значи-тельным растягивающим усилиям	в процессе эксплуатации подвергаются значитель-ным растяги-вающим уси-лиям
В воде	—	—	СКл, АСКл, ОСК, АОСК	В шах-тах	СПШ, ААШв ¹	СБн, СБлн, СВШ, СВ2лШв, ААШв ¹	СПлн, СПШв, СПл

¹ Кабель марки ААШВ следует применять в подземных рудных и нерудных выработках, не опасных по газу и пыли.

Т а б л и ц а 14-25

Коррозионная активность грунтов по отношению к алюминиевым и остальным оболочкам кабелей в зависимости от удельного электрического сопротивления грунта

Степень коррозионной активности	Удельное электрическое сопротивление, Ом · м	Степень коррозионной активности	Удельное электрическое сопротивление, Ом · м
Низкая	Свыше 100	Средняя Высокая	От 20 до 100 До 20

Таблица 14-26

Коррозионная активность грунтов по отношению к алюминиевой оболочке

рН грунта	Содержание, % (масс. воздушно-сухой пробы)			Степень коррозионной активности грунтов
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Fe ³⁺	
6,0—7,5	0,001	0,005	0,002	Низкая
4,5—5,9 7,6—8,5	0,001—0,005 0,001—0,005	0,005—0,01 0,005—0,01	0,002—0,01 0,002—0,01	Средняя
<4,5; >8,5	0,005	0,01	0,01	Высокая

воде, а также на вертикальных участках при закреплении кабеля в одной верхней точке без промежуточных креплений.

В местах воздействия вибраций следует применять кабели с алюминиевой оболочкой или кабели с пластмассовой изоляцией. При необходимости использования в указанных местах кабелей со свинцовой оболочкой должны применяться меры по гашению вибрации и оболочки кабелей должны содержать специальные легирующие присадки.

Способ прокладки кабелей определяется в проекте кабельной линии. Независимо от места и способа прокладки, вида изоляции и номинального напряжения кабелей прокладку их, как правило, осуществляют при положительной температуре окружающей среды.

Минимально допустимая температура прокладки без предварительного подогрева: кабелей с бумажной пропитанной изоляцией и бумажной изоляцией, пропитанной нестекающим составом, 0°С; кабелей с пластмассовой и резиновой изоляцией в поливинилхлоридной оболочке небронированных или в поливинилхлоридном и резиновом шланге 15°С; кабелей с пластмассовой и резиновой изоляцией с защитным покрытием, содержащим волокнистые материалы, —7°С. При необходимости прокладки кабелей в холодное время (при минусовых температурах) должен быть обеспечен предварительный прогрев кабелей.

Наименьшие радиусы изгиба кабелей при прокладке приведены в табл. 14-28 и 14-29. При прокладке кабелей с бумажной пропитанной изоляцией разность уровней между высшей и низшей точками по трассе должна быть не более указанной в табл. 14-30. Разность уровней для кабелей с пластмассовой, резиновой и бумажной изоляцией, пропитанной нестекающим составом, не ограничивается. Концевые муфты и концевые заделки кабелей с бумажной пропитанной изоляцией при указанных разностях уровней и при нормальной нагрузке должны обеспечивать невытекание пропиточного состава и исключать проникновение влаги в кабель.

28*

Таблица 14-27

Коррозионная активность грунтовых и других вод по отношению к алюминиевой оболочке кабелей

рН воды	Содержание, мг/м ³			Степень коррозионной агрессивности вод
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Fe ³⁺	
6,0—7,5	<5,0	<30	<1,0	Низкая
4,5—5,9; 7,6—8,5	5,0—50	30—150	1,0—10	Средняя
<4,5; >8,5	>50	>150	>10	Высокая

Таблица 14-28

Наименьшие допустимые радиусы изгиба силовых кабелей и изолированных жил

Тип и конструкция кабеля	Кратность радиуса внутренней кривой изгиба	
	кабеля по отношению к его наружному диаметру	жилы по отношению к ее диаметру в изоляции
Кабели одножильные в свинцовой оболочке с бумажной изоляцией бронированные и небронированные	25	10
Кабели многожильные в свинцовой оболочке с бумажной изоляцией бронированные и небронированные	15	10
Кабели многожильные в алюминиевой оболочке с бумажной изоляцией бронированные и небронированные	25	10
Кабели с резиновой изоляцией: а) небронированные б) бронированные	10 15	3 3
	6 10	3 3

Допустимые усилия тяжения для кабелей на напряжение до 35 кВ приведены в табл. 14-31, а на напряжение 10 кВ — в табл. 14-32.

Таблица 14-29

Допустимые радиусы изгиба стального трубопровода, предназначенного для протягивания строительных длин маслonaполненных кабелей высокого давления, и максимальные строительные длины

Число изгибов стального трубопровода между двумя колодцами	≤ 2-3
Минимальный радиус изгиба стального трубопровода на участке между двумя муфтами	8 м
Минимальный радиус изгиба медной трубы в разветвительной муфте	2 м

Максимальное расстояние между двумя колодцами (соединительными муфтами):

при протягивании кабелей, армированных двумя проволоками скручивания	≤ 400-600 м
при протягивании в сплошной проволоочной броне	≤ 1200 м

Таблица 14-30

Максимально допустимые разности уровней без применения стопорных муфт (по ГОСТ 18410-73)

Напряже-ние, кВ	Изоляция	Кабели	Разность уровней, м (не более)
1	С вязкой пропиткой	Неброниро-ванные:	
		в алюминиевой оболочке	25
		в свинцовой оболочке	20
	Обедненно-пропитанная	Бронирован-ные В алюминиевой оболочке В свинцовой оболочке	25 Без ограниче-ния при усло-вии промежу-точных креп-лений 100
6	С вязкой пропиткой	В алюми-невой оболочке	20
	Нестекающая	В свинцовой оболочке	15
	Обедненно-пропитанная	В алюми-невой или свинцовой оболочке То же	Без ограни-чения 100
10	С вязкой пропиткой	В алюми-невой или свинцовой оболочке	15
	Нестекающая	То же	Без ограни-чения
20 и 35	С вязкой пропиткой; нестекающая	В алюми-невой или свинцовой оболочке	5* Без ограниче-ния

* Разность уровней стояков у концевых муфт (с учетом периодической замены кабеля) не более 15 м.

Таблица 14-31

Допустимые усилия тяжения для кабелей на напряжение 35 кВ марки ОСБ

Сечение кабеля, мм²	Допустимые усилия тяжения за жилы, кН
3×70	8,2
3×95	10,8
3×120	13,7
3×150	17,6

Таблица 14-32

Допустимые усилия тяжения для кабелей на напряжение до 10 кВ

Сечение жил кабеля, мм²	Допустимые усилия тяжения, кН					
	Тяжение за алю-миниевую оболочку			Тяжение за жилы		
	1 кВ	6 кВ	10 кВ	мед-ные	одно-провод-ные алю-миниевые	однопро-водочные алюмини-евые
3×240	7,4	9,3	9,8	35	27,4	13,7
3×185	6,4	7,4	8,3	26	21,6	10,8
3×150	5,9	6,4	7,4	22	17,6	8,8
3×120	3,9	4,9	6,4	17,6	13,7	6,9
3×95	3,4	4,4	5,7	13,7	10,8	5,4
3×70	2,9	3,9	4,9	10,0	8,2	3,9
3×50	2,3	3,4	4,4	7,0	5,9	3,9
3×35	1,8	2,9	3,9	4,9	3,4	3,4
3×25	1,7	2,8	3,7	3,4	2,9	2,9

Примечание. Однопроводочные жилы сечением более 70 мм² выполнены из мягкого алюминия, относительное удлинение жил не менее 30%.

При прокладке одножильных кабелей в сетях переменного тока должны применяться небронированные кабели, при этом должно соблюдаться указанное в проекте их взаимное расположение. Прокладка одножильных кабелей должна быть обеспечена таким образом, чтобы вокруг каждого кабеля не было замкнутых контуров из магнитных материалов.

Таблица 14-33

Испытательные напряжения для кабелей на напряжение до 35 кВ после прокладки

Тип кабеля	Испытательное напряже-ние, кВ, для кабелей на номинальное напряже-ние, кВ					Продолжи-тельность испытания для каждого способа под-ключения, мин
	3	6	10	20	35	
С бумажной пропитанной изоляцией	18	36	60	120	175	10
С бумажной изоляцией, пропитанной нестекающим составом	—	36	60	—	175	10
С пластмассовой изоляцией	15	30	50	100	175	10
С резиновой изоляцией	6	12	—	—	—	5

После прокладки и окончания монтажа кабельной линии проводятся испытания кабелей на целостность жил, совпадение фаз и повышенным постоянным напряжением. Испытательные напряжения для кабелей на напряжение 3 кВ и выше приведены в табл. 14-33.

14-5. ДОПУСТИМЫЕ ТОКИ НАГРУЗКИ

В соответствии с ПУЭ при длительном времени работы при максимальном токе нагрузка кабелей выбирается исходя из экономической плотности тока (см. разд. 31). Кроме того, ток нагрузки выбирается исходя из максимально допустимой температуры в кабеле. Температура жил кабелей не должна превышать значений, представленных в табл. 14-34. Увеличение температуры выше этих норм приводит к ускоренному старению изоляции, что сопровождается

ется ухудшением электрических свойств. В табл. 14-34 приведены также дополнительные факторы, ограничивающие температуру в кабеле.

Расчет допустимого тока нагрузки производится на основе теплового закона Ома:

$$\theta = pS,$$

где θ — разность температур, °C; p — тепловой поток на 1 м длины кабеля, Вт/м; S — тепловое сопротивление 1 м, °C·м/Вт.

Разность температур жилы и окружающей среды $\theta_{ж}$ в одножильном кабеле

$$\theta_{ж} = (p_{ж} + p_{из}/2) S_{из} + (p_{ж} + p_{из} + p_{об}) (S_{п} + S_{о}),$$

где $p_{ж}$, $p_{из}$ и $p_{об}$ — потери в жиле, изоляции и оболочке на 1 м; $S_{из}$, $S_{п}$ и $S_{о}$ — тепловые сопротивления изоляции, защитных покровов и окружающей среды.

Таблица 14-34

Допустимые температуры нагревания изоляции силовых кабелей при различных режимах работы

Тип кабеля	Напряжение, кВ	Допустимая температура, °С				Основные факторы, ограничивающие допустимую температуру	
		длительно	кратковременно при аварийном состоянии сети	при прохождении тока короткого замыкания при расчете нагрева по выдержке		при нормальной работе и перегрузках	при прохождении тока короткого замыкания
				основной защиты	резервной защиты		
С бумажной изоляцией	1 6 10	80 65 60	Допускаются токовые нагрузки в течение 5 сут в соответствии с табл. 14-51	200 (150 для кабелей с жесткокаменной массой)	Не проверяются	Перемещение пропитывающего состава и образование газовых включений	Разложение изоляции
	20 35	55 50	Не допускаются	175			
С обедненно-пропитанной	1 6	80 75	95 (10%-ная перегрузка в течение 2 ч)	200 (150 для кабелей с алюминиевыми жилами)	То же	То же	То же
С резиновой изоляцией	—	65	110 при пусковых режимах	150	То же	Старение изоляции	Старение изоляции
С изоляцией из полиэтилена или поливинилхлорида	1—35	70	—	120	То же	То же	Старение и размягчение пластмассы
Маслонаполненные и в стальных трубах при прокладке в воздухе	110	80	80 при продолжительности непрерывной работы 100 ч. В течение года общая продолжительность не более 500 ч. Интервал между перегрузками — не менее 10 сут	—	125	Старение изоляции с возрастанием диэлектрических потерь	Возрастание давления в кабеле
В остальных случаях	110—525	70					

Для трехжильного кабеля эта разность равна:

$$\vartheta_{\text{жк}} = 3\rho_{\text{жк}} (S_{\text{из}} + S_{\text{п}} + S_0).$$

В этих кабелях потери в изоляции и оболочке, как правило, значительно меньше потерь в жиле и ими можно пренебречь.

Для кабелей марки ОСБ

$$\vartheta_{\text{жк}} = \rho_{\text{жк}} S_{\text{из}} + (\rho_{\text{жк}} + \rho_{\text{об}}) S_{\text{зап}} + 3(\rho_{\text{жк}} + \rho_{\text{об}}) (S_{\text{п}} + S_0),$$

где $S_{\text{зап}}$ — тепловое сопротивление заполнения между свинцовыми оболочками.

При прокладке нескольких кабелей они нагревают друг друга и тепловой расчет определяется взаимным расположением кабелей. Подробно о тепловом расчете см [14-1].

Потери в оболочке пропорциональны потерям в жиле и выражаются через коэффициент потерь в оболочке $y_{\text{об}}$, причем $\rho_{\text{об}} = y_{\text{об}} \rho_{\text{жк}}$. Величина $y_{\text{об}}$ для одножильных кабелей может быть более 1. Для кабелей марки ОСБ $y_{\text{об}} = 0,1 \div 0,2$.

Ток нагрузки может быть рассчитан, исходя из приведенных выше уравнений. Для одножильных кабелей

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{жк}} - \rho_{\text{из}} (S_{\text{из}}/2 + S_{\text{п}} + S_0)}{R_{\text{жк}} [S_{\text{из}} + (1 + y_{\text{об}}) (S_{\text{п}} + S_0)]}};$$

для трехжильных кабелей

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{жк}}}{3R_{\text{жк}} (S_{\text{из}} + S_{\text{п}} + S_0)}};$$

для кабелей марок ОСБ и ОСК

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{жк}}}{R_{\text{жк}} [S_{\text{из}} + (1 + y_{\text{об}}) S_{\text{зап}} + \frac{\vartheta_{\text{жк}}}{+ 3(1 + y_{\text{об}}) (S_{\text{п}} + S_0)]}}},$$

где $R_{\text{жк}}$ — сопротивление жилы переменному току при максимально допустимой рабочей температуре.

Тепловое сопротивление изоляции кабелей вычисляется по формулам:

а) одножильные кабели и фаза кабеля марки ОСБ

$$S_{\text{из}} = \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi} \ln \frac{R}{r};$$

б) трехжильные кабели с поясной изоляцией с круглой жилой

$$S_{\text{из}} = \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi \cdot 3} G;$$

$$G = (0,85 + 0,2n) \ln [(8,3 - 2,2n)m + 1];$$

в) кабели с числом жил k более 3

$$G = \ln \left[\frac{k(8\Delta + \Delta_1)(\Delta + \Delta_1)}{8r\Delta_1} + 1 \right];$$

Таблица 14-35

Удельные тепловые сопротивления кабельных материалов

Наименование материала	°С·м/Вт
Пропитанная изоляция (бумажная) кабелей с вязкой пропиткой и с нестекающим составом	5,5—7,0
Обедненная пропитанная бумажная изоляция	8,5—10,0
Пропитанная бумажная изоляция маслonaполненных кабелей	4,5—5,0
Резина	5,0—7,0
Полиэтилен	3,0—4,0
Поливинилхлорид	6,0—7,0
Кабельная пряжа	5,0—6,0
Защитные покровы из кабельной пряжи в комплексе с ленточной броней	3,0
Медь	0,0027
Свинец	0,029
Алюминий	0,0048

г) кабели с секторными жилами

$$S_{\text{из}} = 1,1 \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi} \ln \frac{R}{R_{\text{ск}}},$$

$$R = R_{\text{ск}} + \Delta + \Delta_1,$$

где $\sigma_{\text{из}}$ — удельное тепловое сопротивление изоляции (табл. 14-35); R — радиус по изоляции; r — радиус жилы; $R_{\text{ск}}$ — радиус сектора; G — геометрический коэффициент; Δ и Δ_1 — толщина жилой и поясной изоляции; $n = \Delta/\Delta_1$; $m = (\Delta + \Delta_1)/2r$.

Тепловое сопротивление заполнения $S_{\text{зап}}$ в кабелях с отдельно свинцованными жилами можно вычислить по формуле для трехжильных кабелей, в которой в качестве радиуса жилы принят наружный радиус свинцовой оболочки, в качестве толщины жилой изоляции Δ — толщина подушки на каждой оболочке и в качестве толщины поясной изоляции Δ_1 — толщина общей подушки под броней.

При наличии металлических экранов вокруг изолированных фаз тепловое сопротивление изоляции уменьшается и $S_{\text{из}}$ необходимо умножить на коэффициент k_s , значение которого приведено на рис. 14-5.

Параметр

$$p = \frac{\Delta_s \sigma_{\text{из}}}{2r\sigma_s},$$

где Δ_s и σ_s — толщина и удельное тепловое сопротивление экрана; r — радиус жилы.

Тепловое сопротивление защитных покровов вычисляется также, как тепловое сопротивление изоляции:

$$S_{\text{п}} = \frac{\sigma_{\text{п}}}{2\pi} \ln \frac{R_{\text{пв}}}{R_{\text{пн}}},$$

где $\sigma_{\text{п}}$ — удельное тепловое сопротивление защитного покрова (табл. 14-36); $R_{\text{пн}}$ и $R_{\text{пв}}$ — внутренний и внешний радиусы защитного покрова.

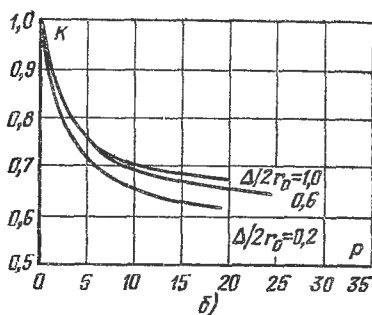
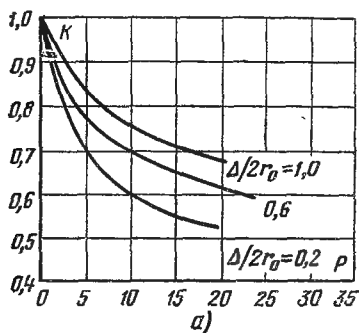


Рис. 14-5. Отношение теплового сопротивления изоляции экранированного кабеля к теплому сопротивлению неэкранированного кабеля.

а — с круглыми жилами; б — с секторными жилами.

Таблица 14-36
Удельное тепловое сопротивление грунта

Грунт	Влажность, %	σ , °С·м/Вт
Песчаный	до 4	2,0
	4-6	1,33
	7-9	0,8
	9	0,53
Песчано-глинистый	2-3	—
	8-12	1,33
	12-14	0,88
	14	0,53
Каменистый	—	2,0

Тепловое сопротивление окружающей среды при прокладке в грунте вычисляется по формуле

$$S_3 = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{4L}{D},$$

где σ_3 — удельное тепловое сопротивление грунта (табл. 14-36); L — глубина прокладки; D — диаметр кабеля.

При расчете должно быть учтено влияние соседних кабелей. Для одножильных кабелей этот учет производится с помощью табл. 14-51. Тепловое сопротивление при прокладке в воздухе вычисляется по формуле

$$S_B = \frac{1}{\pi D \alpha},$$

где D — наружный диаметр кабеля; α — коэффициент теплоотдачи от поверхности кабеля в окружающую среду.

Коэффициент A равен сумме коэффициентов конвективной теплоотдачи α_K и теплопередачи излучением $\alpha_{\text{из}}$. Расчет этого коэффициента для проводов различного диаметра и различных кабелей приведен в [14-1]. Для кабелей диаметром более 5 мм,

проложенных при обычной температуре воздуха в пространстве, размер которого значительно больше диаметра кабеля, коэффициент α , Вт/(м²·°С), может быть вычислен по формуле

$$\alpha = 4,5 \sqrt[4]{\frac{\phi_{\text{п}}}{D}} + \epsilon_{\text{п}} + \sigma \Theta,$$

где $\Theta \approx T_0^3 (4 + 6\phi_{\text{п}}/T_0)$; T_0 — температура

окружающей среды, К; $\phi_{\text{п}}$ — разность температур поверхности кабеля и окружающей среды; $\epsilon_{\text{п}}$ — коэффициент излучения поверхности кабеля; $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана-Больцмана; D — наружный диаметр кабеля, см.

Значение $\epsilon_{\text{п}}$ при наличии защитных покрытий составляет примерно 0,8, для стальной брони 0,5—0,6, а для алюминиевой оболочки 0,2—0,3.

Значение $\phi_{\text{п}}$ обычно составляет около 20°С. Для уточненных расчетов можно использовать метод последовательных приближений, причем $\phi_{\text{п}}$ может быть вычислен по формуле

$$\phi_{\text{п}} = (p_{\text{ж}} + p_{\text{из}} + p_{\text{об}}) S_B.$$

Если монтаж кабелей выполнен на лотках плотной группой, то допустимый ток нагрузки должен быть умножен на снижающий коэффициент $k_{\text{гр}}$:

$$k_{\text{гр}} = \frac{A}{\sqrt{\left(1 + \lg \frac{n}{m}\right) (1 + 2,3 \lg m)}},$$

где n — общее число кабелей в группе; m — число слоев в группе.

Коэффициент $A=1$ для небронированных кабелей, а для бронированных соответственно при однослойной, двухслойной и трехслойной прокладке $A=1,08; 1,15; 1,2$.

Температура окружающей среды при прокладке в группах принимается равной 15°С, в воздухе 25°С и в тоннелях 35°С.

Таблица 14-37

Одножильные кабели с медной жилой с бумажной пропитанной изоляцией в свинцовой оболочке небронированные, прокладываемые в воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей				
	до 3 кВ	6 кВ	10 кВ	20 кВ	35 кВ
2,5	35	—	—	—	—
4	50	—	—	—	—
6	60	—	—	—	—
10	85	75	—	—	—
16	120	110	90	—	—
25	145	135	125	105	—
35	170	155	145	125	—
50	215	200	190	155	—
70	260	240	225	185	180
95	305	280	265	220	215
120	330	300	285	245	249
150	360	325	310	270	265
185	385	350	335	290	285
240	435	395	380	320	315
300	460	420	405	350	340
400	485	440	425	370	—
500	505	460	445	—	—
625	525	—	—	—	—
800	550	—	—	—	—

Примечание. Токовые нагрузки относятся к работе на переменном токе, при этом свинцовые оболочки соединены между собой и заземлены на обоих концах; число рядом лежащих кабелей 3, расстояние между кабелями в свету не более 125 мм и не менее 35 мм.

Таблица 14-38

Трехжильные кабели с отдельно оцинкованными (или с отдельно опрессованными алюминием) медными жилами с бумажной изоляцией, прокладываемые в земле, воде, воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей, прокладываемых					
	в земле		в воде		в воздухе	
	20 кВ	35 кВ	20 кВ	35 кВ	20 кВ	35 кВ
25	110	120	85	—	—	—
35	135	145	100	—	—	—
50	165	180	120	—	—	—
70	200	225	150	195	210	145
95	240	275	180	235	255	180
120	275	315	205	270	290	205
150	315	350	230	310	—	230
185	355	390	265	—	—	—

Таблица 14-39

Провода с медными жилами с резиновой изоляцией для электрифицированного транспорта на напряжения 1, 3 и 4 кВ

Сечение жилы, мм ²	Токовая нагрузка, А	Сечение жилы, мм ²	Токовая нагрузка, А	Сечение жилы, мм ²	Токовая нагрузка, А
1,0	20	16	115	120	390
1,5	25	25	150	150	445
2,5	40	35	185	185	505
4	50	50	230	240	590
6	65	70	285	300	670
10	90	95	340	350	745

Таблица 14-40

Кабели с медными жилами с бумажной пропитанной маслостойкой и нестекающей массой изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке, прокладываемые в земле

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А				
	одножильных кабелей до 1 кВ	двухжильных кабелей до 1 кВ	трехжильных кабелей		
			до 3 кВ	до 6 кВ	10 кВ
2,5	—	45	40	—	—
4	80	60	55	—	50
6	105	80	70	—	60
10	140	105	95	80	85
16	175	140	120	105	115
25	235	185	160	135	150
35	285	225	190	160	175
50	360	270	235	200	215
70	440	325	285	245	265
95	520	380	340	295	310
120	595	435	390	340	350
150	675	500	435	390	395
185	755	—	490	440	450
240	880	—	570	510	—
300	1000	—	—	—	—
400	1220	—	—	—	—
500	1400	—	—	—	—
625	1520	—	—	—	—
800	1700	—	—	—	—

Примечание. Токовые нагрузки на одножильные кабели даны для работы при постоянном токе.

Таблица 14-41

Кабели с медными жилами с бумажной пропитанной маслостойкой и нестекающей массой изоляцией в свинцовой оболочке, прокладываемые в воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А				
	одножильных кабелей до 1 кВ	двухжильных кабелей до 1 кВ	трехжильных кабелей		
			до 3 кВ	до 6 кВ	10 кВ
2,5	40	30	28	—	—
4	55	40	37	—	35
6	75	55	45	—	45
10	95	75	55	55	60
16	120	95	65	65	80
25	160	130	130	90	85
35	200	150	150	110	105
50	245	185	185	145	135
70	305	225	225	175	165
95	360	275	275	215	200
120	425	320	320	250	240
150	470	375	375	290	270
185	525	—	430	325	305
240	610	—	—	375	350
300	720	—	—	—	—
400	880	—	—	—	—
500	1020	—	—	—	—
625	1180	—	—	—	—
800	1400	—	—	—	—

Примечание. Токовые нагрузки на одножильные кабели даны для работы при постоянном токе.

Таблица 14-42

Кабели с медными жилами с бумажной пропитанной маслосанифольной и нестекающей массой изоляцией в свинцовой оболочке, прокладываемые в воде

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А			
	трехжильных кабелей			четырёхжильных кабелей до 1 кВ
	до 3 кВ	до 6 кВ	10 кВ	
16	—	135	120	—
25	210	170	150	195
35	250	205	180	280
50	305	255	220	285
70	375	310	275	350
95	440	375	340	410
120	505	430	395	470
150	565	500	450	—
185	615	545	510	—
240	715	625	585	—

Таблица 14-43

Трёхжильные кабели с медными жилами на напряжение 6 кВ с объединённо-пропитанной изоляцией в общей свинцовой оболочке, прокладываемые в земле, воде и воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей, проложенных		
	в земле	в воде	в воздухе
16	90	100	65
25	120	140	90
35	145	175	110
50	180	220	140
70	220	275	170
95	265	335	210
120	310	385	245
150	355	450	290

Таблица 14-44

Трёхжильные кабели с отдельно освящёнными медными жилами, с объединённо-пропитанной изоляцией, прокладываемые в земле, воде и воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей, проложенных					
	в земле	в воде	в воздухе	в земле	в воде	в воздухе
	6 кВ			10 кВ		
16	90	115	80	—	—	—
25	125	160	105	110	140	100
35	155	195	125	130	170	120
50	185	230	150	160	210	145
70	225	280	190	200	255	180
95	270	340	230	250	305	220
120	310	385	265	290	360	255
150	355	450	310	335	405	295

Таблица 14-45

Кабели и провода с медными жилами с резиновой изоляцией в металлических защитных оболочках и кабели с медными жилами с резиновой или пластмассовой изоляцией в свинцовой, пластмассовой или резиновой оболочке бронеированные и небронеированные (1 кВ)

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей и проводов				
	одножильных		двухжильных		трехжильных
	в воздухе		в воздухе	в земле	в воздухе
1,5	23	19	33	19	27
2,5	80	27	44	25	38
4	41	38	55	35	49
6	50	50	70	42	60
10	80	70	105	55	90
16	100	90	135	75	115
25	140	115	175	95	150
35	170	140	210	120	180
50	215	175	265	145	225
70	270	215	320	180	275
95	325	260	385	220	330
120	385	300	445	260	385
160	440	350	505	305	435
185	510	405	570	350	500
240	605	—	—	—	—

Примечание. Токовые нагрузки относятся к проводам и кабелям как с заземляющей жилой, так и без нее.

Таблица 14-46

Кабели переносные шланговые с медными жилами с резиновой изоляцией для торфопредприятий

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей		
	0,5 кВ	3 кВ	6 кВ
6	44	45	47
10	60	60	65
16	80	80	85
25	100	105	105
35	125	125	130
50	155	155	160
70	190	190	—

Примечание. Токовые нагрузки относятся к шнурам, проводам и кабелям как с заземляющей жилой, так и без нее.

Таблица 14-47

Кабели шланговые с медными жилами с резиновой изоляцией для передвижных электроприёмников

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей		Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей	
	3 кВ	6 кВ		3 кВ	6 кВ
16	85	90	70	215	220
25	115	120	95	260	265
35	140	145	120	305	310
50	175	180	150	345	350

Примечание. Токовые нагрузки относятся к кабелям как с заземляющей жилой, так и без нее.

Таблица 14-48

Провода и шнуры с резиновой и пластмассовой изоляцией с медными жилами

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А					
	Провода проложены в одной трубе	Провода проложены в одной трубе				
		Два одно- жильных	Три одно- жильных	Четыре одножи- льных	Один двух- жильный	Один трех- жильный
0,5	11	—	—	—	—	—
0,75	15	—	—	—	—	—
1	17	16	15	14	15	14
1,5	23	19	17	16	18	15
2,5	30	27	25	25	25	21
4	41	38	35	30	32	27
6	50	46	42	40	40	34
10	80	70	60	50	55	50
16	100	85	80	75	80	70
25	140	115	100	90	100	85
35	170	135	125	115	125	100
50	215	185	170	150	160	135
70	270	225	210	185	195	175
95	330	275	255	225	245	215
120	385	315	290	260	295	250
150	440	360	330	—	—	—
850	510	—	—	—	—	—
240	605	—	—	—	—	—
300	695	—	—	—	—	—
400	830	—	—	—	—	—

Таблица 14-49

Шнуры переносные шланговые легкие и средние, кабели переносные шланговые тяжелые, кабели шахтные гибкие шланговые, прожекторные и провода переносные с медными жилами

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А		
	Одно- жильных	Двух- жильных	Трех- жильных
0,5	—	12	—
0,75	—	16	14
1,0	—	18	16
1,5	—	23	20
2,5	40	33	28
4	50	43	36
6	65	55	45
10	90	75	60
16	120	95	80
25	160	125	105
35	235	185	160
50	235	185	160
70	290	235	200

Примечание. Токовые нагрузки относятся к шнурам, проводам и кабелям как с заземляющей жилой, так и без нее.

Таблица 14-50

Поправочные коэффициенты на число работающих одножильных кабелей, лежащих рядом на земле, в трубах и без них

Число кабелей	1	2	3	4	5	6
Для расстояния в свету 100 мм	1,00	0,90	0,85	0,80	0,78	0,75
То же 200 мм	1,00	0,92	0,87	0,84	0,82	0,81
То же 300 мм	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	0,85

Таблица 14-51

Допустимая кратковременная перегрузка кабелей на напряжение до 10 кВ (по расчетным данным)

Предварительная нагрузка кабелей	Длительность перегрузки, мин	Сечение жилы, мм ²		
		50—95	120—240	300—800
0	30 60	1,15 —	1,25 1,10	1,45 1,20
0,5 номинальной	30 60	1,10 1,05	1,20 1,05	1,40 1,15
0,7 номинальной	30 60	1,05 —	1,15 1,05	1,30 1,10

Таблица 14-52

Допустимые токи нагрузки для кабелей марки ВБВ при одиночной прокладке в воздухе, А

Сечение жилы, мм ²	Число жил		Сечение жилы, мм ²	Число жил	
	2	3 и 4		2	3 и 4
1,5	20	20	25	127	105
2,5	29	27	35	154	132
4	37	34	50	195	161
6	51	43	70	—	201
10	76	60	95	—	238
16	93	78	120	—	—

Таблица 14-53

Длительно допустимые расчетные нагрузки на трехжильные кабели с медными жилами и пластмассовой изоляцией на напряжения 6—35 кВ

Сечение жил, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей			
	в воздухе		в земле	
	6 кВ		10 кВ	
10	55	80	—	—
16	65	105	60	95
25	90	135	85	120
35	110	160	105	150
50	145	200	135	180
70	175	245	165	215
95	215	295	200	265
120	250	340	240	310
150	290	390	270	355
20 кВ			35 кВ	
50	120	165	—	—
70	150	200	145	195
95	180	240	180	235
120	205	275	205	270
150	230	315	—	—

Таблица 14-54

Длительно допустимые расчетные нагрузки на маслonaполненные кабельные линии среднего давления из трех одножильных маслonaполненных кабелей МНСА с медной жилой при прокладке в воздухе с расчетной температурой 25° С и в земле с расчетной температурой 15° С. Свинцовые оболочки соединены и заземлены с двух сторон. Кабели проложены по треугольнику

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм ²	Допустимые нагрузки, А			Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм ²	Допустимые нагрузки, А		
		Прокладка в воздухе	Прокладка в земле				Прокладка в воздухе	Прокладка в земле	
			Одноцепные линии	Двухцепные линии				Одноцепные линии	Двухцепные линии
110	150	450	380	330	220	270	540	440	390
	270	620	510	445		350	615	500	430
	350	710	570	500		500	785	590	500
	500	860	660	575		700	860	650	545
	700	1010	750	640					

Примечание. Для кабелей со стальной проволоочной броней марки МНСК при механизированной прокладке допустимый ток меньше на 6%. Бронепокровы фаз, как и свинцовые оболочки, соединяются и заземляются с двух сторон.

Таблица 14-55

Длительно допустимые расчетные нагрузки на кабельные линии в стальном трубопроводе с маслом под давлением (кабели с медными жилами) при прокладке в земле с расчетной температурой 15° С и в воздухе с расчетной температурой 25° С

а) Одноцепные и двухцепные линии 110 и 220 кВ

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм ²	Внешний диаметр трубопровода с антикоррозийным покрытием, мм	Допустимые нагрузки, А			Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм ²	Внешний диаметр трубопровода с антикоррозийным покрытием, мм	Допустимые нагрузки, А		
			Прокладка в воздухе	Прокладка в земле					Прокладка в воздухе	Прокладка в земле	
				Одно-цепные линии	Двух-цепные линии					Одно-цепные линии	Двух-цепные линии
110	150	144	420	330	300	220	270	211	520	425	380
	270	159	590	450	395		400	239	630	495	450
	400	186	735	540	475		550	239	730	555	500
	550	186	860	615	540		800	239	830	615	540
	800	211	980	670	585						

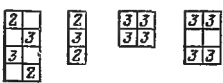
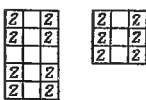
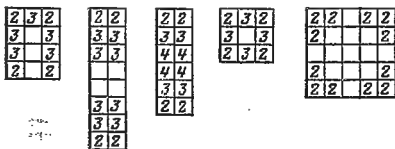
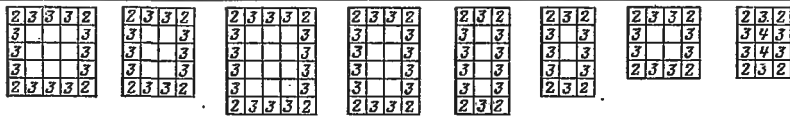
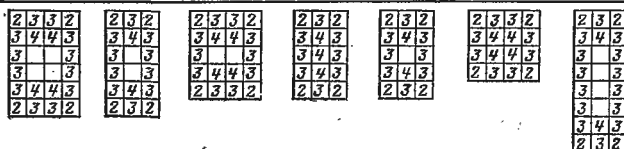
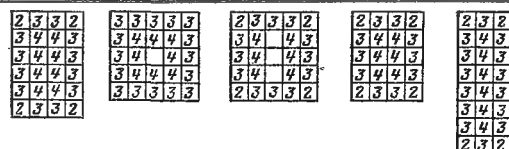
б) Одноцепные линии на 380 и 525 кВ*

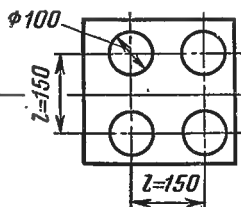
Напряжение, кВ	Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Прокладка в земле				Прокладка в воздухе			
		Естественное охлаждение	Искусственное охлаждение		без вентиляции	с вентиляцией (скорость воздуха 1,5—2 м/с)	без вентиляции, но с искусственным охлаждением		
			Длина секции, м				Длина секции, м		
			300	1000			300	1000	
380	550	490	860	750	690	750	870	785	
	700	520	975	835	750	830	970	880	
	1000	550	1140	980	880	980	1140	1035	
	1500	575	1325	1130	990	1100	1340	1200	
525	500	435	820	710	650	710	830	742	
	700	460	940	820	730	800	950	856	
	1000	490	1105	960	800	930	1120	1005	
	1500	490	1280	1105	950	1060	1300	1165	

* Продольная циркуляция масла в трубопроводе и охлаждение масла в теплообменниках. Температура входящего масла 25° С, скорость масла в трубопроводе 10 см/с, расход масла 10 м³/ч.

Таблица 14-56

Допустимые токи нагрузки для кабеля, проложенного в блоках

Группы	Конфигурация блоков	№ отвер- стий	I_a , А
I	1	1	191
II		2	173
		3	167
III		2	154
IV		2	147
		3	138
V		2	143
		3	135
		4	131
VI		2	140
		3	132
		4	118
VII		2	136
		3	132
		4	119
VIII		2	135
		3	124
		4	104
IX		2	135
		3	118
		4	100
X		2	133
		3	116
		4	81
XI		2	129
		3	114
		4	79



При изменении температуры окружающей среды допустимый ток нагрузки должен быть умножен на коэффициент

$$k_{cp} = \sqrt{\frac{T_m - T_{o2}}{T_m - T_{o1}}},$$

где T_m — максимально допустимая температура жилы; T_{o1} — расчетная температура окружающей среды; T_{o2} — измененная температура окружающей среды, для которой необходимо пересчитать ток нагрузки.

Допустимые токи нагрузки в соответствии с ПУЭ приведены в табл. 14-37—14-55.

В таблицах приводится допустимый ток нагрузки только для кабелей с медными жилами. Для кабелей с алюминиевыми жилами ток нагрузки должен быть умножен на коэффициент 0,77.

Токи нагрузки для кабелей, проложенных в грунте, рассчитаны исходя из удельного теплового сопротивления грунта 1,2 °С·м/Вт.

Допустимые токи нагрузки I_1 для кабеля на напряжение 10 кВ с сечением жил $3 \times 95 \text{ мм}^2$, проложенного в блоках, приведены в табл. 14-56. Для других сечений жил ток нагрузки вычисляется по формуле

$$I = abcl_1,$$

где a — коэффициент, приведенный в табл. 14-57; b — коэффициент, равный соответственно для кабелей на напряжения 3; 6 и 10 кВ — 1,09; 1,05 и 1,007; c — поправочный коэффициент на среднесуточную нагрузку блока, определяемый в зависимости от отношения среднесуточной передаваем-

Таблица 14-57

Поправочные коэффициенты a на сечение кабеля

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Номер канала блока			
	1	2	3	4
25	0,44	0,46	0,47	0,51
35	0,54	0,57	0,57	0,60
50	0,67	0,69	0,69	0,71
70	0,81	0,84	0,84	0,85
95	1,00	1,00	1,00	1,00
120	1,14	1,13	1,13	1,12
150	1,33	1,30	1,45	1,38
185	1,60	1,46	1,45	1,38
240	1,78	1,70	1,68	1,55

Таблица 14-58

Коэффициент уменьшения допустимой токовой нагрузки на кабели, прокладываемые в параллельных блоках одинаковой конфигурации

Расстояние между блоками, мм	500	1000	1500	2000	2500	3000
Коэффициент	0,85	0,89	0,91	0,93	0,95	0,96

мой мощности к номинальной, равный 1,07 для отношения 0,85 и 1,16 для отношения 0,7.

При прокладке параллельно двух блоков должны быть уменьшены нагрузки на кабели (табл. 14-58).

14-6. АРМАТУРА СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Кабельная арматура предназначена для соединения строительных длин кабеля, а также для оконцевания кабельных линий. В зависимости от назначения кабельную арматуру можно разделить на следующие основные группы:

1) соединительные муфты и их разновидности (ответвительные, соединительно-разветвительные) — арматура для соединения между собой отдельных строительных длин кабелей;

2) стопорные и полустопорные муфты — арматура для соединения строительных длин и одновременного секционирования кабельных линий с целью предотвращения перетекания масла или пропиточного состава из секции в секцию;

3) концевые муфты и концевые заделки — арматура для оконцевания кабелей на открытом воздухе и внутри помещений.

Кроме кабельной арматуры в данном разделе будет рассмотрена аппаратура для поддержания в заданных пределах давления масла в маслонаполненных кабельных линиях.

Общие технические требования на кабельную арматуру напряжением 1—35 кВ представлены в ГОСТ 13781.0-78 (для силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией) и ГОСТ 23953.0-80 (для силовых кабелей с пластмассовой изоляцией), а на кабельную арматуру напряжением 110 и 220 кВ — в ОСТ 16.0538.003-71. Типы муфт имеют соответствующие обозначения (табл. 14-59 и 14-60).

Муфты типов С, Ст, СтП и СП могут иметь защитные кожухи трех типов: К — защитный кожух для муфт, проложенных в помещении или в специальных сооружениях; К_з — защитный кожух для муфт, проложенных в земле; К_в — защитный кожух для муфт, проложенных под водой.

Материал корпуса муфты и кожуха также имеет буквенное обозначение, например Ч — чугун, С — свинец, Л — латунь, Ст — сталь, П — пластмасса, Э — эпоксидный компаунд и др. Условное обозначение марки муфты состоит из обозначения типа муфты, типа и материала кожуха, буквы, означающей конструктивные особенности исполнения (например, О — однофазная муфта, Э — со сплошным экраном, М — малогабаритная и т. д.). Далее указываются количество фаз и сечение жил кабеля, напряжение и номер соответствующего ГОСТ или технического условия на муфту. Пример условного обозначения соединительной латунной однофазной муфты со сплошным экраном с защитным подземным кожухом

Т а б л и ц а 14-59

Обозначение типов муфт напряжением 1—35 кВ

Обозначение	Наименование муфты	Область применения	Номера ГОСТ или технической документации на арматуре
С	Муфта соединительная	Соединение силовых кабелей с бумажной пропитанной и пластмассовой изоляцией с защитными покровами или без них	ГОСТ 13781.1-79, ГОСТ 13781.2-77, ГОСТ 13781.3-79
О	Муфта ответвительная	Для присоединения распределительных кабельных линий к магистральной кабельной линии	Документация пересматривается
Ст	Муфта стопорная	Для соединения кабелей, проложенных на трассах с разностями уровней, превышающими указанные в ГОСТ 18410-73, и для соединения кабелей с вязкой пропиткой изоляции с кабелями с обеденно-пропитанной изоляцией или с изоляцией, пропитанной нестекающим составом	Документация пересматривается
СтП	Муфта стопорная переходная	Для соединения кабелей с вязкой пропиткой изоляции в общей металлической оболочке с кабелями с обеденно-пропитанной изоляцией, пропитанной нестекающим составом, и отдельными металлическими оболочками	Документация пересматривается
СП	Муфта соединительная переходная	Для соединения кабелей с пластмассовой изоляцией с кабелями с бумажной изоляцией	Документация пересматривается
КН	Муфта концевая наружной установки	Для оконцевания кабелей на открытом воздухе	ГОСТ 13781.4-76, ТУ 16.538.259-71
КМ	Муфта концевая мачтовая	Для оконцевания кабелей на открытом воздухе при переходе на воздушную линию электропередачи	ТУ 16.538.260-71
КВ	Муфта концевая внутренней установки	Для оконцевания кабелей внутри помещений	ТУ 16.538.251-75

Т а б л и ц а 14-60

Марки и область применения муфт на 110 и 220 кВ для кабелей низкого давления марок МНС, МНСА, МНСШ и МНСК и кабелей высокого давления марки МВДТ

Марка	Наименование муфты	Область применения	Номер технической документации
МКСМ	Муфта концевая для маслонаполненного кабеля низкого давления	Для присоединения кабельных линий к электрическим аппаратам или воздушным линиям	ОСТ 160.538.003.1-71
МСМС	Муфта соединительная для маслонаполненного кабеля низкого давления	Для соединения отдельных строительных длин кабеля	ОСТ 160.538.003.3-71
КМВДТ	Муфта концевая для маслонаполненного кабеля высокого давления	Для присоединения кабельных линий к электрическим аппаратам или воздушным линиям	ОСТ 160.538.003.2-71
СМВДТ	Муфта соединительная для маслонаполненного кабеля высокого давления	Для соединения отдельных строительных длин кабеля	ОСТ 160.338.003.4-71
СРМВДТ	Муфта соединительно-разветвительная для маслонаполненного кабеля высокого давления	Для соединения отдельных строительных длин кабеля с кабелем разводки фаз от магистрального трубопровода к концевым муфтам	ОСТ 160.538.003.5-71
ПМВДТ	Муфта полустопорная маслонаполненного кабеля высокого давления	Для соединения отдельных строительных длин кабеля и разделения масляного питания при ремонтных работах	ОСТ 160.538.003.6-71
КТСДУ	Ввод кабельный унифицированный в трансформатор	Для присоединения кабельной линии к трансформатору	ТУ 16.538.210-73

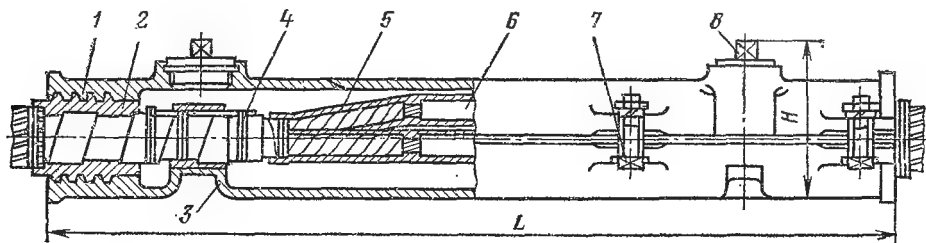


Рис. 14-6. Соединительная чугунная муфта типа СЧМ на 1 кВ.

1 — верхняя полумуфта; 2 — подмотка из смоляной ленты; 3 — нижняя полумуфта; 4 — провод заземления; 5 — изолирующая подмотка; 6 — гильза соединительная; 7 — стягивающий болт; 8 — пробка заливочного отверстия.

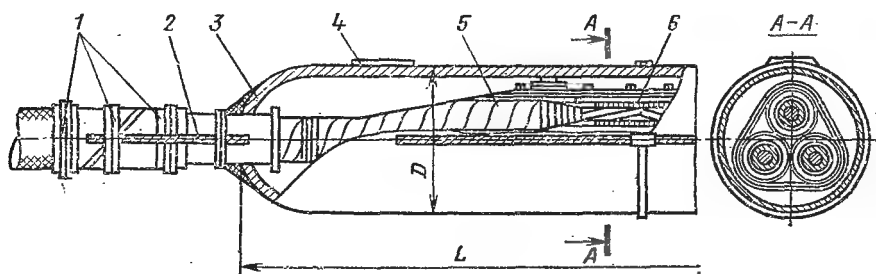


Рис. 14-7. Свинцовая соединительная муфта типа СС для кабелей на 6—10 кВ.

1 — бандаж; 2 — провод заземления; 3 — корпус муфты; 4 — заливочное отверстие; 5 — подмотка рулонами; 6 — гильза соединительная.

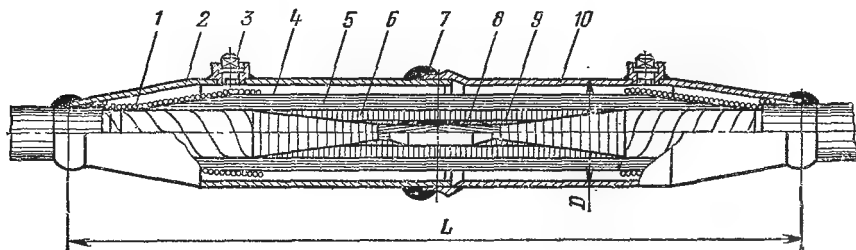


Рис. 14-8. Соединительная латунная муфта типа СЛЮ на 20 и 35 кВ.

1 — экран из свинцовой проволоки; 2 — полумуфта левая; 3 — пробка; 4 — экран из металлизированной бумаги; 5 — подмотка трапецидальным рулоном; 6 — подмотка роликами шириной 10 мм; 7 — пайка; 8 — гильза; 9 — подмотка роликами шириной 5 мм; 10 — полумуфта правая.

для кабеля с сечением жил $3 \times 120 \text{ мм}^2$ на напряжение 35 кВ: «Муфта СЛЮэ-К₃Ч-3 $\times$ 120-35 ГОСТ 13781.3-79». Муфты для силовых кабелей с пластмассовой изоляцией в условном обозначении имеют еще индексы, обозначающие изоляцию кабеля (П — полиэтилен и поливинилхлорид, Пв — вулканизированный полиэтилен) и материала изоляции муфты (Э — эпоксидная, сл — на основе самосклеивающихся лент, эл — эластомерная и т. д.).

Пример условного обозначения соединительной муфты на основе самосклеивающихся лент с защитным подземным пластмассовым кожухом для кабеля с изоляцией из полиэтилена и поливинилхлорида сечением жил $3 \times 120 \text{ мм}^2$ на напряжение 6 кВ: «Муфта ПССл-К₃П-3 $\times$ 120-6 ГОСТ...».

Для соединения отдельных строительных длин силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на 1—35 кВ могут применяться как муфты в металлическом корпусе с заливкой либо битуминозной массой, либо маслосканифольной заливочной массой, так и эпоксидные муфты. Последние менее пожароопасны по сравнению с металлическими.

Конструкция металлических муфт зависит от напряжения. Для соединения кабелей на напряжение 1 кВ применяются соединительные чугунные муфты (рис. 14-6) типа СЧМ, для кабелей на напряжение 6 и 10 кВ — свинцовые муфты типа СС (рис. 14-7). Свинцовые соединительные муфты при прокладке в земле защищаются от механических повреждений защитными кожухами.

Таблица 14-61

Типы и основные размеры металлических муфт для кабелей 1—35 кВ

Тип муфты	Кабели					Размеры, мм	
	Напряжение, кВ					муфты *, L×B×H или L×D	защитного кожуха, длина× × диаметр
	1	6	10	20	35		
	Сечение жилы, мм²						
СЧм-40	До 35	—	—	—	—	475×134×83	—
СЧм-50	50, 70	—	—	—	—	560×149×94	
СЧм-60	95	—	—	—	—	630×174×107	
СЧм-70	120, 150	—	—	—	—	700×182×115	
СЧм-70	185, 240	—	—	—	—	—	
СС-60	—	10, 16	—	—	—	450×60	880×96
СС-70	—	25, 35, 50	До 25	—	—	475×70	
СС-80	—	70, 95	35, 50	—	—	525×80	970×118
СС-90	—	120, 150	70, 95	—	—	550×90	
СС-100	—	185, 240	120, 150	—	—	600×100	1080×148
СС-110	—	—	185, 240	—	—	890×110	
СЛОэ-20	—	—	—	95—185	—	640×65	1775×246
СЛОэ-85	—	—	—	—	70—150	740×80	2000×276

* Размер В — ширина муфты.

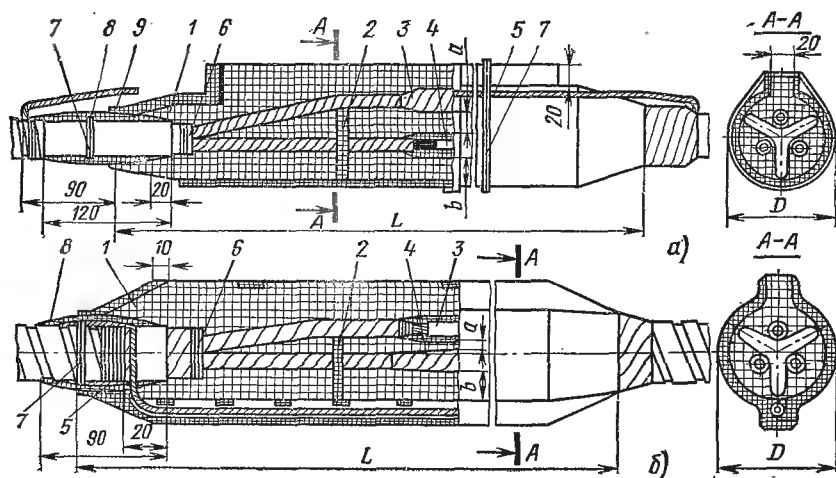


Рис. 14-9. Соединительная эпоксидная муфта на 6—10 кВ.

а — с поперечным разъемом типа СЭп; б — с вертикальным разъемом типа СЭв; 1 — корпус муфты; 2 — распорка; 3 — подмотка жилы; 4 — соединение жил; 5 — провод заземления; 6 — бандаж из суровых ниток; 7 — проволоочный бандаж; 8 — герметизирующая подмотка; 9 — уплотняющая подмотка.

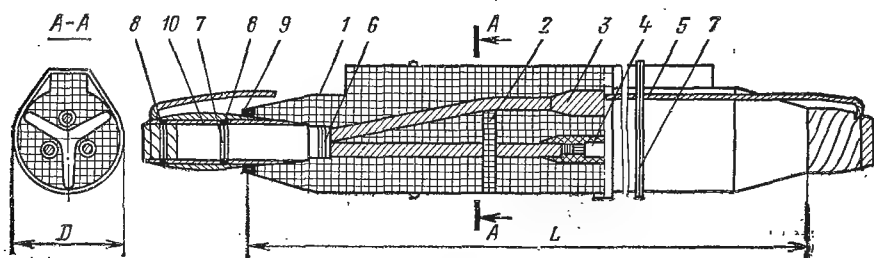


Рис. 14-10. Соединительная муфта типа СЭС на напряжение 1 кВ.

1 — корпус муфты; 2 — распорка; 3 — подмотка соединения жил; 4 — соединение жил; 5 — провод заземления; 6 — бандаж из суровых ниток; 7 — бандаж из проволоки; 8 — пайка; 9 — уплотняющая подмотка; 10 — герметизирующая подмотка.

хами из чугуна типов К₃Ч, К₃ЧГ (герметичное исполнение) или из стеклопластика К₃П.

Для соединения кабелей на напряжение 20 и 35 кВ применяются латунные однофазные муфты типов СЛО-20 и СЛО-35 (рис. 14-8). При прокладке в земле для защиты от механических повреждений и коррозии три однофазные муфты помещаются в общий металлический кожух (чугунный или стальной) или кожух из стеклопластика.

Основные габаритные размеры металлических соединительных муфт приведены в табл. 14-61.

Эпоксидные соединительные муфты типа СЭ применяются для соединения кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 1—10 кВ как на горизонтальных участках трассы, так и при прокладке кабелей на наклонных трассах с разностью уровней между высшей и низшей точками, превышающей указанную в ГОСТ 18410-73. В этом случае они играют роль стопорных муфт. Корпуса соединительных муфт на 6—10 кВ типа СЭВ или СЭп (рис. 14-9) (с вертикальным или поперечным разъемом) должны отливаться на заводе. Корпуса муфт типа СЭс на 1 кВ отливаются непосредственно при монтаже в съемные металлические или пластмассовые формы (рис. 14-10). Соединительные муфты типа СЭп или СЭВ имеют ряд преимуществ по сравнению с муфтами типа СЭс, а именно: корпус муфты, отлитый в заводских условиях, имеет более высокие электрические свойства, кроме того, уменьшается количество эпоксидного компаунда, заливаемого в муфту при монтаже. В связи с этим муфты типа СЭс применяются только для кабелей напряжением 1 кВ, а муфты типа СЭп или СЭВ — для кабелей на 6 и 10 кВ. Размеры эпоксидных соединительных муфт приведены в табл. 14-62.

Для соединения кабелей марки ОСБ на 20 и 35 кВ, а также в качестве стопорных муфт для этих же кабелей при их прокладке по наклонной трассе наряду с латунными однофазными муфтами могут также применяться эпоксидные однофазные муфты типа СЭО.

Соединение кабелей с пластмассовой изоляцией на 1 кВ может производиться с помощью эпоксидных муфт типа ПСЭс-1—ПСЭс-8 или в металлических муфтах с применением пластмассовой изоляции мест соединения, накладываемой методом горячего прессования. Однако наиболее перспективными являются муфты с изолированием мест соединения самосклеивающимися лентами на основе полиолефинов и кремнийорганических каучуков [(муфты марки ПССл (рис. 14-11)].

Толщина подмотки самосклеивающимися лентами изоляции муфт на напряжение 10 кВ составляет около 10 мм, длины муфт для кабелей на 6—10 кВ с сечением жил 95—240 мм² находятся в пределах 540—600 мм.

Таблица 14-62

Размеры эпоксидных, соединительных муфт (рис. 14-9 и 14-10)

Типоразмеры муфт	Сечение жил, мм ² , кабеля для напряжения, кВ			Основные размеры, мм	
	1	6	10	L	D
СЭс-2	16—50	—	—	400	50
СЭс-3	70—120	—	—	440	75
СЭс-4	150—240	—	—	510	80
СЭп-5	—	10—70	16—50	670 (570)	75
СЭп-6	—	95—120	70—95	720 (620)	85
СЭп-7	—	150—185	120—150	760 (660)	100
СЭп-8	—	240	185—240	830 (730)	110

Примечание. В скобках указаны размеры L для муфт СЭВ-5—СЭВ-8.

Конструкции соединительных муфт маслonaполненных кабелей приведены на рис. 14-12 и 14-13. Усиливающая подмотка этих муфт выполняется из рулонов предварительно пропитанной кабельной бумаги. Основным отличием соединительной муфты для кабеля в стальной трубе от муфты для маслonaполненного кабеля низкого давления является размещение трех фаз муфт кабеля высокого давления в общем стальном корпусе.

Для предотвращения стекания пропиточного состава по кабелям с вязкой пропиткой на 1—35 кВ при их прокладке по наклонным трассам применяются стопорные муфты. Расстояния между муфтами выбираются так, чтобы давление от вертикального столба пропиточной массы не нарушало герметичности муфт кабеля. На кабельных линиях 1—10 кВ применяются стопорные муфты двух конструкций: типа Ст со стопорами из бакелитизированной бумаги и обычные эпоксидные соединительные муфты типа СЭ, причем предпочтение отдается в основном последующему типу.

Для кабелей на 20—35 кВ также используются два типа стопорных муфт: металлические стопорные муфты типа СтО со стопорами из бакелитизированной бумаги и металлические соединительные муфты типа СтЭО, в которых роль стопора выполняет подмотка из стеклоленты, пропитанной эпоксидным компаундом. По конструкции эти муфты аналогичны муфтам типа СЛО и отличаются от них наличием эпоксидного барьера.

Стопорные муфты маслonaполненного кабеля также предназначены для ограничения гидростатического и гидродинамического давления масла в линии. В стопорной муфте производится соединение двух строительных длин кабелей, а также разделение изолирующего масла в двух смежных секциях кабельной линии. Конструкция стопорной муфты маслonaполненного кабеля представлена на рис. 14-14. Роль стопора по маслу здесь выполняет фарфоровый изолятор. Габариты муфты могут быть значительно уменьшены, если вместо фарфорового изолятора применять эпоксидный стопорный изолятор, размеры которого могут быть

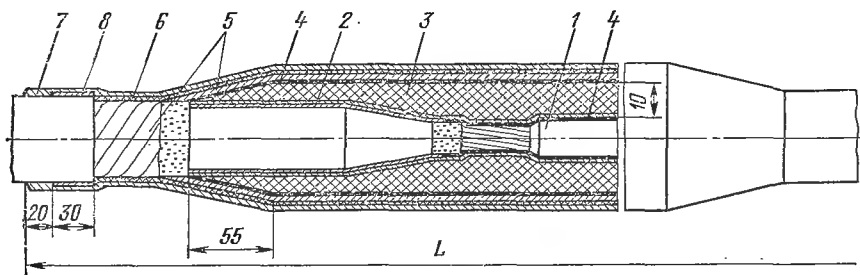


Рис. 14-11. Соединительная муфта на напряжение 10 кВ (ПСО_{сд}-1, ПСО_{сл}-2).

1 — гильза соединительная; 2 — адгезионные прослойки; 3 — восстановленная изоляция жилы (из ленты ЛЭТСАР); 4 — полупроводящий экран; 5 — восстановленный металлический экран; 6 — подмотка лентой из ПВХ пластика; 7 — восстановленный наружный покров (трубка термоусаживаемая или лента ЛЭТСАР); 8 — адгезионная прослойка из ленты А (для герметизации термоусаживаемой трубки).

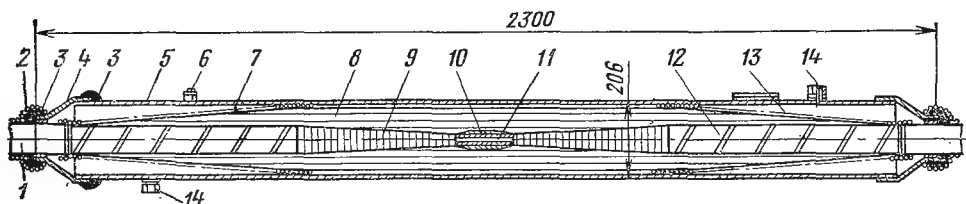


Рис. 14-12. Соединительная муфта маслонаполненного кабеля низкого давления на 220 кВ.

1 — оболочка кабеля; 2 — усиливающий проволоочный бандаж; 3 — пайка; 4 — раструб; 5 — корпус муфты; 6 — болт заземления; 7 — выравнивающий конус; 8 — изоляция кабеля; 9 — разделка кабеля; 10 — соединительная гильза; 11 — жила кабеля; 12 — изоляция кабеля; 13 — изоляционное масло МН-4; 14 — заглушка.

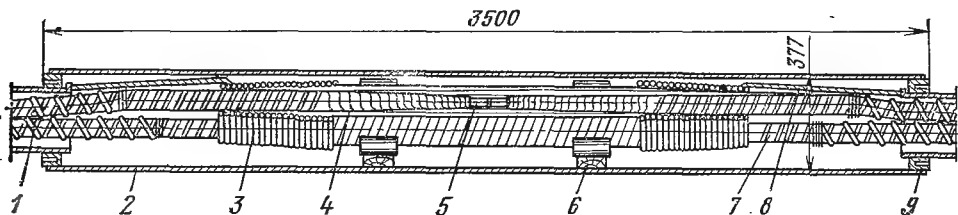


Рис. 14-13. Соединительная муфта маслонаполненного кабеля высокого давления в стальной трубе на 220 кВ.

1 — жила кабеля; 2 — корпус муфты; 3 — проволоочный экран; 4 — рулонная подмотка; 5 — соединительная гильза; 6 — подставка; 7 — медная перфорированная лента; 8 — провод заземления; 9 — переходное кольцо.

выполнены с большей точностью, что позволяет значительно уменьшить масляный зазор между изолятором и кабельной разделкой, который является наиболее слабым местом в изоляции муфты в электрическом отношении.

Для оконцевания кабелей на 1—35 кВ внутри закрытых помещений применяются концевые заделки и муфты. Концевые муфты кабелей на 1—10 кВ внутри помещений применяются только в особо тяжелых условиях эксплуатации (повышенная влажность окружающей среды, опасность механических повреждений). Однако для кабелей на 20—35 кВ с бумажной пропитанной изоляцией концевые муфты внутри помещений применяются часто.

Концевые заделки можно разделить на две группы:

1) сухие концевые заделки, при монтаже которых не применяются кабельные заливочные составы. Сюда относятся заделки типа КВЭ и КВР (для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией) и типа ПКВ (для кабелей с пластмассовой изоляцией);

2) концевые заделки, при монтаже которых применяются заливочные кабельные составы. Эти составы сохраняют термостатические свойства и в период эксплуатации (например, битумные составы). К таким заделкам относятся заделки типов КВБ и КВС, которые по существу являются устаревшими конструкциями.

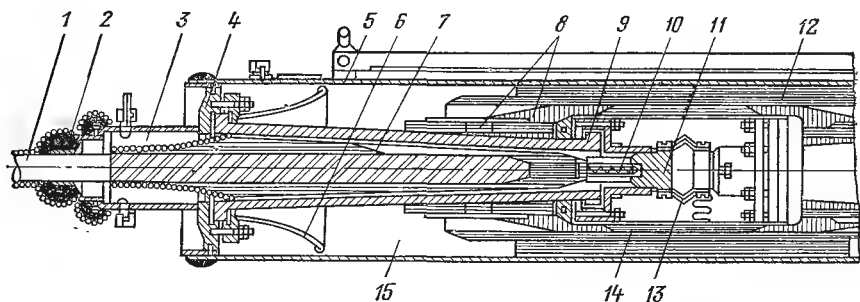


Рис. 14-14. Стопорная муфта маслonaполненного кабеля низкого давления на 110 кВ с фарфоровыми стопорными изоляторами.

1 — кабель; 2 — пайка, усиленная проволоочным бандажом; 3 — внутренняя камера; 4 — фланец; 5 — корпус муфты; 6 — экран; 7 — кабельная разделка; 8 — подмотка роликами; 9 — фарфоровый изолятор; 10 — контактный наконечник; 11 — контактное гнездо; 12 — рулонная изоляция; 13 — гибкое соединение; 14 — цилиндрический экран; 15 — наружная камера.

Конструкции заделок типа КВЭ представлены на рис. 14-15, основные геометрические размеры — в табл. 14-63. В заделках типа КВЭ герметизация жил разделанного кабеля осуществляется с помощью

Таблица 14-63

Геометрические размеры заделок типа КВЭ с трехслойными трубками (рис. 14-15)

Типоразмер заделки	Сечение жил трехжильного кабеля, мм ² , при напряжении, кВ			Основные размеры, мм	
	1	6	10	H	D
КВЭт-3	25—50	10—16	—	160	80
КВЭт-5	70—95	25—35	16	185	90
КВЭт-6	120—150	50—70	25—35	190	100
КВЭт-7	185	95—120	50—70	195	110
КВЭт-8	240	150—185	95—120	205	120
КВЭт-10	—	240	150—240	225	135

трехслойных трубок из полиэтилена и поливинилхлорида (тип КВЭт) или найритовой резины (типы КВЭн и КВЭз), надеваемых на жилы. Основания таких заделок для улучшения герметизации и увеличения механической прочности заливаются эпоксидным компаундом. В заделках типа ПКВ (рис. 14-16) герметизация жил кабеля осуществляется обмоткой липкими самосклеивающимися изоляционными лентами, наложенными по оболочке кабеля и по жилам у места их разводки. Заделки типа ПКВ на 10 кВ имеют конусную подмотку из липких самосклеивающихся лент. В сырых помещениях обычно вместо заделок ПКВ применяются усиленные заделки типа ПКВэ (рис. 14-17), которые в основании имеют корпус, отлитый из эпоксидного компаунда. Заделки типов ПКВ и ПКВэ не подразделяются на типоразмеры, и размеры их пол-

ностью определяются сечением жил кабеля и условиями эксплуатации.

Концевые муфты внутренней установки для кабелей до 10 кВ типа КВЭп имеют эпоксидные корпуса. Из муфт выводятся провода в пластмассовом шланге, жилы которых соединяются с жилами кабеля внутри муфты (рис. 14-18).

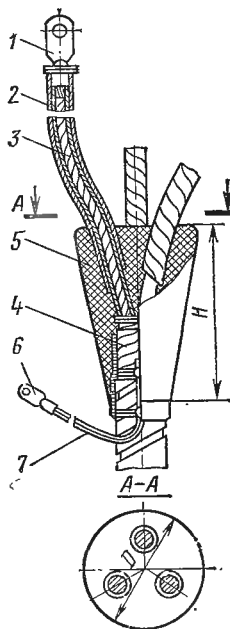


Рис. 14-15. Концевые заделки типа КВЭ с пластмассовыми трубками на жилах.

1 — наконечник; 2 — трехслойная пластмассовая трубка; 3 — изолированная жила; 4 — металлическая оболочка кабеля; 5 — корпус из эпоксидного компаунда; 6 — наконечник провода заземления; 7 — провод заземления.

Для оконцевания кабелей с бумажной изоляцией на 20—35 кВ внутри помещений наиболее перспективными являются эпоксидные муфты типа КВЭО.

Муфты, предназначенные для оконцевания кабелей в наружных установках, делятся на две основные группы: муфты типа КН (КНЧ, КНА и т. д.) с вертикально расположенными изоляторами (при соединении кабелей с трансформаторами и распределительными устройствами, рис. 14-19) и муфты типа КМ (КМЧ, КМА) с изоляторами, расположенными наклонно, — мачтовые муфты (для соединения кабелей с воздушными линиями электропередачи рис. 14-20). Муфт-

ты типа КН и КМ имеют металлические корпуса (чугунный — Ч или алюминиевый — А) и фарфоровые изоляторы. Оконцевание кабелей до 10 кВ может также выполняться эпоксидными муфтами типа КНЭ, у которых корпус и изоляторы отливаются из эпоксидного компаунда. Эпоксидные муфты легче металлических и монтаж их значительно проще.

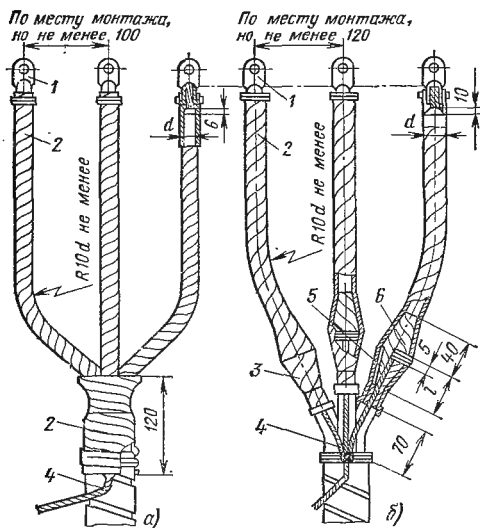


Рис. 14-16. Концевые заделки типа ПКВ для кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 6 (а) и 10 кВ (б).

1 — кабельный наконечник; 2 — подмотка из самосклеивающейся ленты; 3 — конусная подмотка; 4 — провод заземления; 5 — металлический экран; 6 — экран из полупроводящего материала.

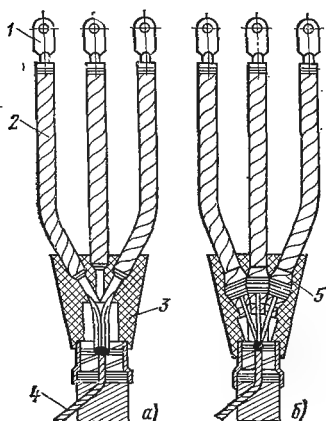


Рис. 14-17. Концевые заделки типа ПКВэ для кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжения 6 (а) и 10 кВ (б).

1 — кабельный наконечник; 2 — подмотка из самосклеивающихся лент; 3 — эпоксидный корпус; 4 — провод заземления; 5 — конусная подмотка.

Оконцевание кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на напряжения 20 и 35 кВ производится муфтами типа КНО и КНОк (с температурным компенсатором). В некоторых случаях можно для этих целей применять более легкие и простые в монтаже эпоксидные муфты типа КНЭО.

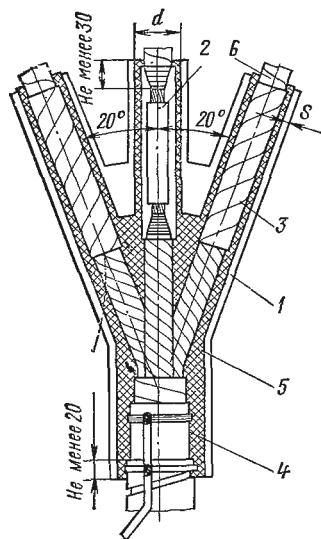


Рис. 14-18. Эпоксидная муфта типа КВЭп для оконцевания кабелей с бумажной изоляцией внутри помещения.

1 — эпоксидный корпус; 2 — гильза медная; 3 — изолирующая подмотка; 4 — герметизирующая подмотка; 5 — эпоксидный компаунд; 6 — выводные концы (кабель марки ВВ).

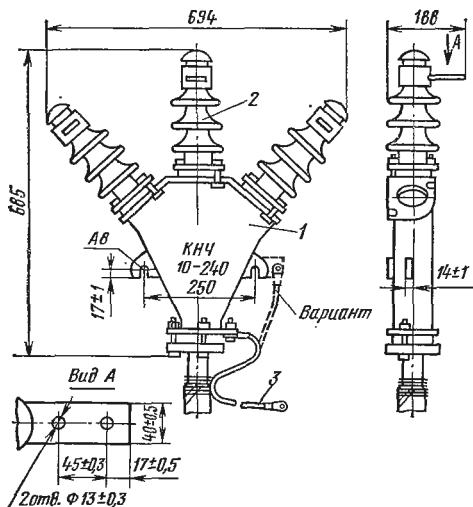


Рис. 14-19. Трехфазная концевая муфта наружной установки типа КНЧ для кабелей на напряжение 6 и 10 кВ.

1 — металлический корпус; 2 — фарфоровый изолятор; 3 — заземляющий провод.

Для оконцевания кабелей с пластмассовой изоляцией на 1—35 кВ наиболее перспективными являются муфты типа ПКНэл и ПКНО с изоляцией из эластомеров (рис. 14-21).

Для оконцевания маслonaполненных кабелей на 110 кВ и выше применяются три типа муфт: концевые муфты открытого типа для работы внутри помещения и в на-

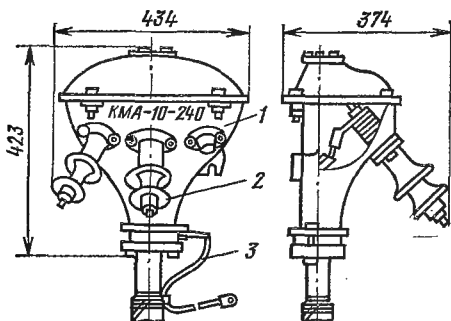


Рис. 14-20. Трехфазная масляная муфта типа КМА для трехжильных кабелей на напряжение 6 и 10 кВ.

1 — металлический корпус; 2 — фарфоровый изолятор; 3 — заземляющий провод.

ружных установках и концевые муфты закрытого типа для ввода в аппараты высокого напряжения — трансформаторы, реакторы, распределительные устройства и т. п.

Муфты открытого типа (рис. 14-22) отличаются только устройством внешнего изолятора. Наиболее распространенными муфтами закрытого типа являются кабельные вводы в трансформатор (рис. 14-23). Их конструкция существенно отличается от концевых муфт открытого типа, так как размещение кабельной муфты в среде масла позволяет существенно уменьшить ее размеры.

Внутренняя изоляция концевых муфт кабелей на 110 кВ и выше содержит экраны, позволяющие регулировать напряженность электрического поля внутри муфты. Регулирование поля в муфтах на напряжение 220 кВ и выше обычно осуществляется с помощью конденсаторных обкладок или конденсаторных элементов.

Для поддержания определенного давления в кабельных линиях низкого давления применяются баки давления (рис. 14-24) марок БД-6-0,25 и БД-7-0,25. Эти же баки используются для поддержания избыточного давления в кабелях и стопорных муфтах во время их изготовления, транспортировки, хранения и монтажа. Давление масла в кабелях при подключении к линии баков поддерживается в определенных пределах за счет батареи сильфонных элементов с избыточным давлением азота в них $2,5 \cdot 10^4$ Па ($0,25$ кгс/см²), расположенных внутри кожуха бака. Избыточное давление масла в баках, готовых к использо-

ванию, составляет $20 \cdot 10^4$ — $30 \cdot 10^4$ Па ($2,0$ — $3,0$ кгс/см²). Отдача масла баками при изменении избыточного давления от $30 \cdot 10^4$ до $2,5 \cdot 10^4$ Па ($3,0$ — $0,25$ кгс/см²) при температуре 20°C составляет 50 л для бака

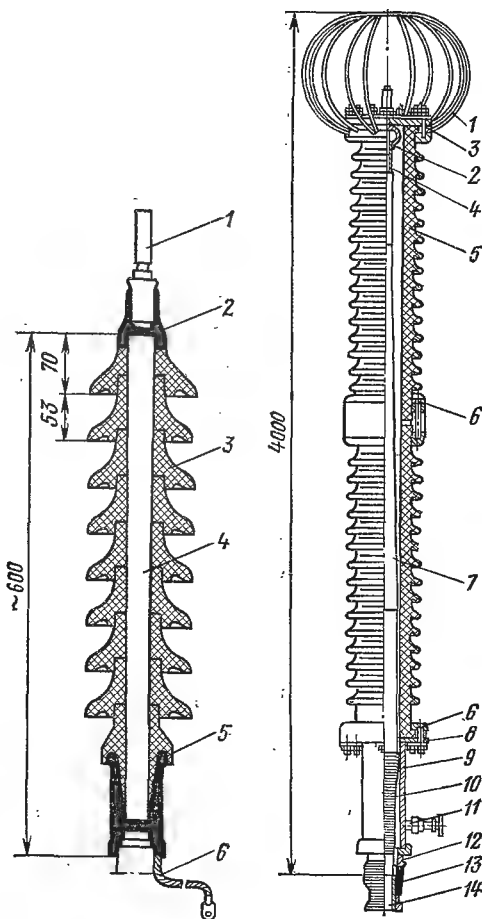


Рис. 14-21. Концевая эластомерная муфта наружной установки типа ПКНО для кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 35 кВ.

1 — наконечник; 2 — подмотка из самосклеивающейся ленты; 3 — юбка; 4 — кабель; 5 — выравнивающий конус; 6 — провод заземления.

Рис. 14-22. Концевая муфта маслonaполненной кабеля низкого давления на напряжение 220 кВ.

1 — верхний экран; 2 — токовыводное устройство; 3 — крышка муфты; 4 — жила кабеля; 5 — изолятор; 6 — стоечное соединение; 7 — концевая кабельная заделка (конденсаторная подмотка); 8 — опорная плита; 9 — металлическая труба хвостовика; 10 — выравнивающий конус; 11 — сильфонный вентиль; 12 — переходный патрубков; 13 — пайка; 14 — изоляция кабеля.

марки БД-6-0,25 и 30 л для бака марки БД-7-0,25. Количество баков, необходимое для подпитки кабельной линии, а также места размещения пунктов подпитки определяются с учетом режимов работы кабельных линий, условий прокладки и про-

филя трассы. Расстояние между подпитывающими пунктами для маслonaполненных кабелей низкого давления обычно лежит в пределах от 1 до 2 км.

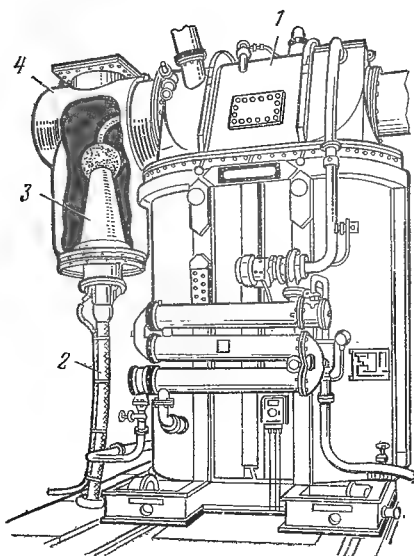


Рис. 14-23. Однофазный трансформатор со встроенным кабельным вводом.

1 — трансформатор; 2 — кабель; 3 — концевая муфта; 4 — промежуточная камера.

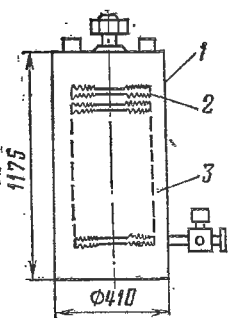


Рис. 14-24. Схема устройства бака давления (бак БД-6-0,25).

1 — корпус; 2 — батарея сильфонных элементов; 3 — масло.

Для поддержания давления в маслonaполненных кабелях высокого давления применяется автоматическая подпитывающая насосная установка (рис. 14-25). Основными частями установки являются: бак для хранения масла под вакуумом, масляный насос, подающий масло из бака в линию, если давление падает ниже 1,4 МПа, перепускной вентиль, автоматически пропускающий масло из линии в бак при повышении давления свыше 1,6 МПа. Основные узлы в установке дублированы для обеспечения ее надежной работы.

Для обеспечения работы линии длиной 3 км достаточно установки с емкостью бака около 4000 л.

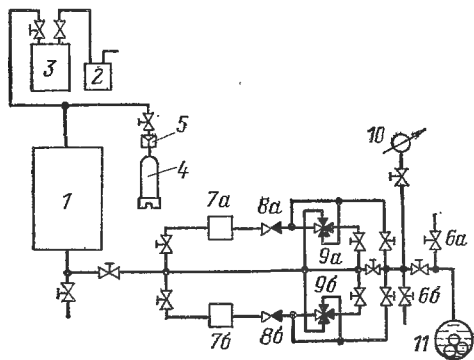


Рис. 14-25. Принципиальная схема подпитывающей установки.

1 — бак для хранения масла под вакуумом; 2 — вакуумный насос; 3 — маслоотделительный бак; 4 — баллон с азотом; 5 — редуктор; 6a — вентиль для взятия пробы масла из линии; 6b — вентиль для взятия пробы масла из подпитывающей установки; 7a и 7b — масляные насосы высокого давления; 8a и 8b — обратные клапаны; 9a и 9b — перепускные клапаны; 10 — манометр, контролирующий давление масла в линии; 11 — трубопровод кабельной линии.

14-7. КОНТРОЛЬНЫЕ КАБЕЛИ И КАБЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ

Контрольные кабели применяются для подведения маломощных низковольтных управляющих сигналов к разнообразным техническим устройствам и схемам информации о характере протекающих в них процессах. В настоящее время контрольные кабели выпускаются преимущественно с резиновой и пластмассовой изоляцией. В соответствии с ГОСТ 1508-71 они предназначены для неподвижного присоединения к электрическим приборам, аппаратам, сборкам зажимов электрических распределительных устройств номинальным переменным напряжением до 660 В частотой до 100 Гц или постоянным до 1000 В.

Токопроводящие жилы контрольных кабелей изготавливаются из медной (М) или алюминиевой (А) проволоки. Установлены следующие размерные ряды для сечений токопроводящих жил (мм^2): медных — 0,75; 1,0; 1,5; 2,5; 4; 6; алюминиевых — 2,5; 4; 6; 10.

Изоляция изготавливается из кабельной пропитанной бумаги (в ограниченном масштабе), резины (Р), поливинилхлоридного пластика (В), полиэтилена низкой плотности (П), самозатухающего полиэтилена (Пс), вулканизированного полиэтилена, фторопласта.

Изолированные жилы скручиваются в сердечник, который может состоять из следующего числа изолированных жил: 4, 5, 7, 10, 14, 19, 37, 52, 61. Поверх сердечника накладывается обмотка лентами из бумаги или синтетических пленок для обеспечения механической устойчивости и облегчения наложения оболочки из пластмасс или ре-

зины. Для оболочки используются следующие материалы: свинец (С), алюминий, стальная лента (гофрированная) (Ст), негорючая резина (Н), поливинилхлоридный пластикат (В), светостабилизированный полиэтилен, кремнийорганическая резина. В зависимости от условий прокладки и эксплуатации применяются следующие виды броневых и защитных покровов: а) броня из двух стальных лент с противокоррозийным покрытием (БГ) или из одной профилированной (ББГ) или из двух стальных оцинкованных лент (БГц)—при прокладке внутри помещений, в каналах, туннелях, если кабель не подвергается воздействию значительных растягивающих усилий; б) броня из двух стальных лент с наружным защитным покровом (Б) или в шланге из поливинилхлоридного пластиката (ББШв)—при прокладке в земле (траншеях), если кабель не подвергается воздействию значительных растягивающих усилий; в) броня из плоских оцинкованных проволок с наружным защитным покровом или в шланге из поливинилхлоридного пластиката (ПБШв)—при прокладке в каналах, туннелях, земле (траншеях), если кабель подвергается воздействию значительных растягивающих усилий; г) броня из круглых стальных оцинкованных проволок с наружным защитным покровом (К) или в шланге из поливинилхлоридного пластиката—при прокладке под водой и в местах, где кабель подвергается значительным растягивающим усилиям. При прокладке в помещениях, каналах, туннелях и отсутствии механических воздействий на кабель броневой покров отсутствует (Г).

По степени защищенности от внешних помех контрольные кабели изготавливаются неэкранированными и экранированными (в общем экране) (Э).

В условном обозначении (марке) кабеля содержится информация о назначении кабеля (К—контрольный), материалах жилы, изоляции, оболочки, виде и конструкции брони и защитного покрова, при этом пользуются для обозначения буквами, приведенными выше в скобках.

В контрольных кабелях общего применения, эксплуатируемых в естественных условиях и не имеющих ограничения по габаритам и массе, применяется резиновая изоляция. В аналогичных кабелях, а также в кабелях, применяемых в пожароопасных местах и в местах с повышенной концентрацией химически агрессивных веществ, используется изоляция из поливинилхлоридного пластиката. Для кабелей, габариты и масса которых ограничены, эксплуатирующихся в естественных условиях, применяется изоляция из полиэтилена низкой плотности. В аналогичных кабелях, эксплуатируемых в пожароопасных помещениях, используется изоляция из самозатухающего полиэтилена. Для кабелей с повышенной надежностью, для кабелей с жесткими ограничениями по габаритам и массе при повышенных плотностях тока, для кабелей,

эксплуатируемых в пожароопасных помещениях и в среде с повышенной химической активностью применяется изоляция из сополимеров тетрафторэтилена (фторопласт-40Ш).

Технические данные жил контрольных кабелей приведены в табл. 14-64—14-69.

Кабели управления. Кабели управления, как и контрольные кабели, используются для передачи мало-мощных низковольтных сигналов. Однако в отличие от последних они используются при существенно отличающихся условиях эксплуатации (подвижная эксплуатация, необходимость обеспечения защиты от взаимных и внешних помех, увеличенное число электрических цепей в кабеле, стойкость к действию различных механических, климатических воздействий и др.), которые определяют специфику конструкций этой группы кабелей.

В соответствии с ГОСТ 18404.0-73 «Кабели управления. Общие технические условия» кабели управления предназначены для передачи сигналов малой мощности переменным напряжением до 1000 В частотой до 5000 Гц или постоянным до 1400 В от датчиков к аппаратуре контроля и используются для дистанционного управления исполнительными механизмами при подвижном присоединении. Одним из признаков, отличающих конструкции кабелей управления, является сочетание материалов, используемых для изготовления изоляции и оболочки. Возможные сочетания этих материалов приведены в табл. 14-70.

При отсутствии требований по помехозащищенности кабели управления выполняются неэкранированными. Если требуется защита цепей от взаимных помех, то кабели изготавливают со всеми экранированными изолированными жилами или с частью таких жил.

Если требуется защита от внешних помех, кабели изготавливают в общем (одинарном или двойном) экране. По составу и строению сердечника кабели управления могут быть однородными (сердечник состоит из экранированных или неэкранированных жил одного сечения), неоднородными (жилы разного сечения) или комбинированными (сердечник состоит из различных по назначению цепей—контроля и управления, силовых, высокочастотных и др.).

В соответствии с ГОСТ 18404.0-73 для кабелей управления установлены следующие ряды:

ряд сечений токопроводящих жил: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,5 мм².

ряд чисел изолированных жил однородных кабелей управления: 3, 4, 7, 14, 19, 27, 30, 37, 52, 61, 91, 108.

Ряд рабочих и испытательных напряжений приведен в табл. 14-71.

Принципы маркообразования кабелей управления регламентированы ГОСТ 18404.0-73. Каждому кабелю присваивают марку, состоящую из буквенных обозначе-

Таблица 14-64

Толщина изоляции жил контрольных кабелей

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Номинальная толщина изоляции, мм			
	резиновой	из поливинилхлоридного пластика	полиэтиленовой	фторопластовой
0,75	1,0	0,6	0,6	0,3
1,0—1,5	1,0	0,7	0,6	0,3
2,5	1,0	0,7	0,6	0,5
4	1,0	0,8	0,6	0,5
6	1,2	0,8	0,6	0,5
10	1,2	1,0	0,8	0,8

Таблица 14-65

Толщина оболочек контрольных кабелей

Диаметр кабеля под оболочкой, мм	Номинальная толщина оболочки, мм			
	Свинцов		Резина	Поливинилхлоридный пластикат
	для кабелей, работающих под водой	для остальных кабелей		
До 6	1,05	0,95	1,5	1,2
6—10	1,05	0,95	1,7	1,5
10—15	1,05	0,95	2,0	1,5
15—20	1,05	0,95	2,2	1,7
20—23	1,15	1,05	2,2	1,7
23—25	1,25	1,15	2,2	1,7
25—26	1,25	1,15	2,5	1,9
26—30	1,40	1,25	2,5	1,9
30—33	1,40	1,25	3,0	2,1
33—36	1,40	1,40	3,0	2,1
36—40	1,50	1,50	3,0	2,1
Свыше 40	1,60	1,60	4,0	2,3

Сортамент контрольных кабелей

Таблица 14-66

Марка	Материал жилы	Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Число изолированных жил
<i>Кабели с резиновой изоляцией</i>			
КРСГ, КРСБ, КРСБГ, КРСК ¹	М М	1; 1,5; 2,5 4; 6	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37 4, 7, 10
КРВГ, КРВГЭ, АКРВГ, АКРВГЭ	М	0,75; 1,0; 1,5	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37, 52
КРВБ, АКРВБ, КРВБГ, АКРВБГ, КРВБ6Г, АКРВБ6Г, КРНГ, АКРНГ, КРНБ, АКРНБ, КРНБГ, АКРНБГ, КРНБ6Г, АКРНБ6Г	М, А М, А А	2,5 4; 6 10	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37 4, 7, 10 4, 7, 10
<i>Кабели с поливинилхлоридной изоляцией</i>			
КВВГ, КВВГЭ, АКВВГ, АКВВГЭ, КВВБ, АКВВБ, КВВБГ, АКВВБГ, КВВБ6Г, АКВВБ6Г, КВВБШ ¹ , КВВБШ ² , АКВВБШ ²	М М, А М, А А	0,75; 1,0; 1,5 2,5 4; 6 10	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37, 52, 61 4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37 4, 7, 10 4, 7, 10
<i>Кабели с полиэтиленовой изоляцией</i>			
КПВГ, АКПВГ, КПВБ, АКПВБ, КПВБГ, АКПВБГ, КПВБ6Г, КПВБ6Г, КПВБШ ¹ , КПВБШ ² , КПВБШ ³ , КПВБШ ⁴ , КПВБШ ⁵ , КПВБШ ⁶	М М, А М, А А	0,75; 1,0; 1,5 2,5 4; 6 10	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37, 52, 61 4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37 4, 7, 10 4, 7, 10
<i>Кабель с изоляцией из полиэтилена высокой плотности</i>			
КПВБ	М М М	1,0 1,5 2,5	4, 24, 37 24, 37, 52 37
<i>Кабель с изоляцией из фторопласта-40Ш</i>			
КФР	М	1,5	3, 5, 7, 12, 19

¹ Кабели изготавливаются с числами жил 10—37 при 0,75—1,5 мм², 7—37 при 2,5 мм² и 7, 10 при 4 и 6 мм².

² Кабели изготавливаются с числами жил 10—27 при 1,5 мм², 10—19 при 2,5 мм², 7, 10 при 4 и 6 мм² и 4, 7 при 10 мм².

³ Кабели изготавливаются с числами жил 19—52 при 1,5 мм², 14—37 при 2,5 мм², 10 при 4 и 6 мм² и 7, 10 при 10 мм².

⁴ Кабели изготавливаются с числами жил 10—37 при 0,75; 1,0 и 1,5 мм², 7—37 при 2,5 мм² и 7, 10 при 4 и 6 мм².

Таблица 14-67

Основные электрические параметры контрольных кабелей

Параметр	Кабели контрольные				
	с полиэтиленовой изоляцией	с резиновой изоляцией	с изоляцией из ПВХ пластика	КПВБ	КФР
Электрическое сопротивление изоляции в нормальных условиях, 10^3 МОм·м, не менее	250	50	5	1000	50
Испытательное напряжение частотой 50 Гц, В:					
в состоянии поставки	—	2500	—	1500	2000
на протяжении срока службы	—	1500	—	Не нормируется	Не нормируется

Таблица 14-68

Основные механические параметры контрольных кабелей

Параметры	Кабели контрольные				
	бронированные в свинцовой оболочке	небронированные в свинцовой оболочке	в прочих оболочках	КПВБ	КФР
Радиус изгиба при монтаже, не менее кратности по отношению к наружному диаметру кабеля	12	10	7	5	5
Изгибы при эксплуатации		Не допускаются			100 двойных перегибов

Таблица 14-69

Параметры, характеризующие стойкость кабелей к эксплуатационным воздействиям и их надежность

Параметр	Кабели контрольные				
	с изоляцией из ПВХ пластика	с полистиленовой и резиновой изоляцией		КПВБ	КФР
	в оболочке из ПВХ пластика без наружного покрова и в шланге из ПВХ пластика	в других оболочках			
Температура окружающей среды, °С	-50 ÷ +50			-50 ÷ +50	-50 ÷ +150
Предельно допустимая температура жилы, °С	70	65	65	70	150
Предельно допустимая влажность окружающей среды	98 % при температуре до 40° С			90 % при температуре до 40° С	
Стойкость к воздействию химических агрессивных сред	Стойки		Нестойки	Стойки	Нестойки
Стойкость к вибрационным нагрузкам	Не нормирована			Частота 5—600 Гц, ускорение до 100 м/с² Ускорение до 350 м/с² Ускорение до 1500 м/с²	Не нормирована
Стойкость к многократным ударам	То же				То же
Стойкость к одиночным ударам	Не нормирована				Не нормирована
Срок службы	12 лет			—	—

Таблица 14-70

Сочетания материала изоляции жил и оболочки в кабелях управления

Материал изоляции	Материал оболочки
Резина нормальной нагревостойкости Поливинилхлоридный пластикат Полиэтилен высокой плотности То же Полиэтилен — капрон Фторопласт То же Кремнийорганическая резина Фторопласт	Резина нормальной нагревостойкости Поливинилхлоридный пластикат То же Резина нормальной нагревостойкости То же » » Кремнийорганическая резина То же Резина на основе фторкаучука

Таблица 14-71

Ряд рабочих и испытательных напряжений для кабелей управления

Рабочее напряжение, В		Испытательное переменное напряжение (частота 50 Гц), В
переменное	постоянное	
100	150	1000
250	350	1500
500	700	2000
1000	1400	3000

Таблица 14-72

Буквенное обозначение материала изоляции и оболочки в маркировке кабелей управления

Материал изоляции или оболочки	Условное обозначение
Резина изоляционная и шланговая нормальной нагревостойкости Поливинилхлоридный пластикат Полиэтилен Полиэтилен — капрон Фторопласт Кремнийорганическая резина Резина на основе фторкаучука	Р В П ПК С ФС

ний, указывающих (последовательно): группу кабелей (КУ), материал изоляции (согласно табл. 14-72), наличие общего экрана (одинарного — Э, двойного ЭЭ), материал оболочки (табл. 14-72), наличие панцирной оплетки (П). Если изоляция жил и оболочки кабеля выполнена из однотипного материала, то в обозначение марки входит только одна буква, соответствующая данному материалу. Если кабель имеет плоскую форму, перед обозначением марки кабелей ставится буква П.

По нагревостойкости кабели управления делятся на две группы — кабели нормальной и повышенной нагревостойкости.

Из кабелей нормальной нагревостойкости (максимальная температура длительной эксплуатации не превышает 70°С) ка-

бели с резиновой изоляцией и оболочкой в основном применяются для подвижной эксплуатации, с полиэтиленовой изоляцией и с оболочкой из поливинилхлоридного пластика для фиксированной прокладки, с оболочкой из резины — для подвижной эксплуатации, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных пластикутов в основном для неподвижной прокладки в пожароопасных помещениях при возможности контакта с техническими маслами, бензином и другими агрессивными средами. Наиболее надежной конструкцией кабелей управления нормальной нагревостойкости является конструкция с комбинированной изоляцией из полиэтилена и капрона и резиновой оболочкой. Эти кабели могут применяться для подвижной эксплуатации в сложных атмосферных условиях.

К кабелям управления повышенной нагревостойкости относятся кабели с изоляцией из фторопласта-40П (180°С), кремнийорганической резины (200°С) и фторопласта-4 (250°С). Они применяются для специальных целей и используются в тех случаях, когда температура окружающей среды находится в пределах 100—250°С. Кабели с изоляцией из фторопласта-40П и фторопласта-4 с оболочками из кремнийорганической резины или резины на основе фторкаучуков применяются для неподвижной прокладки.

Для подвижной эксплуатации используются кабели с изоляцией и оболочкой из кремнийорганической резины.

Сортамент и основные технические параметры кабелей управления приведены в табл. 14-73.

14-8. СИЛОВЫЕ И УСТАНОВОЧНЫЕ ПРОВОДА И СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ШНУРЫ

Силовые и установочные провода с резиновой и пластмассовой изоляцией для электротехнических установок служат для распределения энергии силовых и осветительных установок при неподвижной прокладке на открытом воздухе и внутри помещений, а провода некоторых марок — при открытой прокладке в трубах или под штукатуркой, а также для питания электродвигателей и подключения промышленной и лабораторной переносной аппаратуры и приборов.

Провода изготавливаются на напряжения 380, 660 и 3000 В переменного тока. Номенклатура проводов для электротехнических установок и преимущественные области применения приведены в табл. 14-74, сортамент, наружные диаметры (или размеры) проводов и массы — в табл. 14-75—14-81, допустимые токовые нагрузки — в табл. 14-48.

Провода с резиновой изоляцией допускают длительный нагрев жил до 65°С, с теплоустойчивой резиной на основе бутылкаучука — до 85°С, с кремнийорганической

Таблица 14-73

Сортамент и основные технические параметры кабелей управления

Марка кабеля	Сечение жил, мм ²	Число жил (число экран жил)	Толщина изоляции, мм	Толщина оболочки, мм	Наружный диаметр кабеля, мм	Расчетная масса, кг/км	Примечание
КРШУ	1,0	4—37	0,8	2,0—2,5	11,6—25,9	200—1180	Изоляция—резина и прорезиненная тканевая лента; экран — медная луженая проволока (МЛП); обмотка — прорезиненная тканевая лента; оболочка — резина; панцирная броня — стальная оцинкованная проволока (СОП), 2 — нержавеющая стальная проволока (НСП), 3 — медная луженая проволока
КРШУЭ	1,0	4—37	0,9	2,0—2,5	15,0—35,7	300—1940	
КУШГТВ, КУШГТВ-П (1), КУШГТВ-Пн (2), КУШГТВ-Пм (3)	0,35 0,5	7—108 7—108	0,30 0,30	1,4—2,1 1,4—2,1	8,4—22,7 8,7—23,9	68—810 78,7—965	
КУШГТР, КУШГТР-П, КУШГТР-Пн, КУШГТР-Пм	0,35 0,5 0,75 1,0 1,5	4—108 4—108 4—37 4—37 4—37	0,30 0,30 0,40 0,42 0,40	1,4—2,4 1,4—2,4 1,6—2,2 1,6—2,2 1,6—2,4	8,2—23,9 8,5—25,1 9,8—19,8 10,3—21,2 11,0—23,7	58—879 64,8—1081 92—643 103—760 134—1016	
КЭРШ, КЭРШ-П, КЭРШ-Пн, КЭРШ-Пм	0,35 0,5 0,35 0,5 0,15 1,0 1,5	16—115 (9—63) 16—115 (9—63) 4—52 4—52 4—19 2—19 4—19	0,30 0,30 0,45 0,45 0,45 0,42 0,5	1,8—2,6 1,8—2,6 1,6—2,4 1,6—2,4 1,6—2,0 1,6—2,2 1,6—2,4	14,4—27,3 14,9—29,0 10,5—25,9 10,5—26,7 11,2—18,7 12,0—20,6 13,0—23,1	237—1310 263—1481 106—1006 113—1090 130—565 154—706 207—972	Изоляция — ПЭ; экран — медная луженая проволока (МЛП); обмотки — полиамидная пленка, прорезиненная тканевая пленка (ПТП); панцирная броня — стальная оцинкованная проволока, нержавеющая стальная проволока, медная луженая проволока; оболочка — резина
КПКР, КПКР-П	0,5 0,75	12 4 7	0,25 0,25 0,25	2,2 2,0 2,2	13,6 10,7 12,1	209—295 119—185 170—244	
КУПКР	0,5 1,0	12 37 27	0,25	1,4 1,5 1,6	10,9 15,8 17,1	182 400 502	
КФШР, КФЭШР	0,5 0,20 0,35 0,20 0,35	10—48 24(7) 45(7) 10 19	0,25 0,25 0,25 0,25	2,4—3,2 2,4 3,4 2,4 2,5	10,6—18,0 12,6 18,3 10,9 13,2	155—529 233 511 170 282	
КБФРТ	0,5 0,75	12 14 4 7	0,30	2,0 1,5	12,3 15,2 8,8 9,8	282 434 147 192	Изоляция — фторопласт-40Ш; две обмотки — ориентированной пленкой фторопласта-4; экран — медная луженая проволока; оболочка — резина ШНН-45Л

Продолжение табл. 14-73

Марка кабеля	Сечение жил, мм ²	Число жил (число экр., жил)	Толщина изо- ляции, мм	Толщина обо- лочек, мм	Наружный диаметр ка- беля, мм	Расчетная масса, кг/км	Примечание
КДФР	0,20 0,35 1,0	3—52 3—52 61	0,30 0,30 0,4	1,2—1,5 1,2—1,7 1,8	8,5—17,1 9,0—19,2 27,5	82,1—349 94—540 1268	Изоляция фторопласт- 40Ш; обмотка — ориенти- рованная пленка Ф-4; экран — КДФР отсутствует, в КДФЭР — медная луженая провока; вторая обмотка в КДФЭР — ориентирован- ная пленка Ф-4; оболочки— резина ШНН-45Л; оплет- ка—шелк, лавсан
КДФЭР	1,5 0,20 0,35 0,20 0,35	3—52 3—52 3—52 9—32 (7—17)	0,4 0,30 0,30 0,4 (0,3)	1,2—2,0 1,2—1,7 1,2—1,8 1,2—1,5 1,2—1,5	11,3—28,8 9,4—18,9 9,8—21,0 12,5—19,5 10,4—15,4	167—1467 107—522 162—679 198—543 132—322	
КУС	0,5 0,12	1 7	1,0 0,5	1,0	8,6	85	Изоляция — кремнийор- ганическая резина; экран— посеребренная проволока; обмотка по экрану и по сер- дечнику—ориентированная пленка Ф-4; оболочка — кремнийорганическая рези- на
КФРВ	0,75	19	0,25	1,7	11,2	201	Изоляция фторопласт- 40Ш; обмотка—ориенти- рованная пленка Ф-4; оплет- ка — шелк, лавсан, пропи- танный феноловым ла- ком; оболочка—кремнийор- ганическая резина, армиро- ванная лавсаном
КУФЭФС	0,75	2	0,3	1,2	6,5	84,6	Изоляция—фторопласт- 40Ш; экран—медная луже- ная проволока; обмотка— ориентированная пленка Ф-4; оболочка—фторкаучук

Таблица 14-74

Марки, элементы конструкции и области применения силовых и установочных проводов

Обозначе- ние марок	Наименование элементов проводов	Преимущественные области применения	ГОСТ или ТУ
<i>Провода силовые с резиновой изоляцией</i>			
ПРТО	Провод с медной жилой, с рези- новой изоляцией, в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, пропи- танной противогнилостным соста- вом	Для прокладки в негорюемых трубах	ГОСТ 20520-80
АПРТО ПРН	То же с алюминиевой жилой Провод с медной жилой, с рези- новой изоляцией, в негорючей резиновой оболочке	То же Для прокладки в сухих и сырых помещениях, в пустотных каналах негорюемых строительных конст- рукций, а также на открытом воз- духе	То же » »
АПРН	То же с алюминиевой оболоч- кой	То же	» »
ПРГН	То же с медной гибкой жилой	Для прокладки при повышенной гибкости при монтаже и для соеди- нения подвижных частей элект- рических машин в сухих и сырых помещениях, а также на открытом воздухе	» »
ПРИ	Провод с медной жилой, с рези- новой изоляцией, обладающей за- щитными свойствами	Для прокладки в сухих и сырых помещениях	» »
АПРИ ПРГИ	То же с алюминиевой жилой То же с медной гибкой жилой	То же Для прокладки при повышенной гибкости при монтаже и для соеди- нения подвижных частей элект- рических машин в сухих и сырых помещениях	» » » »
АППР	Провод с алюминиевой жилой, с резиновой изоляцией, не распро- страняющей горение, с раздели- тельным основанием	Для прокладки по деревянным поверхностям и конструкциям жи- лых и производственных сельскохо- зяйственных помещений, включая и животноводческие помещения	» »

Продолжение табл. 14-74

Обозначение марок	Наименование элементов проводов	Преимущественные области применения	ГОСТ или ТУ
ПРД	Провод гибкий, с медной жилой, с резиновой изоляцией, в неопропитанной оплетке, двухжильный, скрученный	В осветительных сетях сухих помещений	ТУ 16-505. 904-76
ПРВД	Провод гибкий, с медной жилой, с резиновой изоляцией, двухжильный, скрученный, в поливинилхлоридной оболочке	В осветительных сетях сухих и сырых помещений	То же
АРТ	Провод с алюминиевой жилой, с резиновой изоляцией, с несущим тросом	Прокладка внутри помещений в сетях напряжением 660 В, где требуется повышенная механическая прочность	ГОСТ 14175-78
ПРП	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, в оплетке из стальных оцинкованных проволок	В осветительных и силовых цепях, вторичных сетях стационарных установок и механизмов при наличии легких механических воздействий на провод и отсутствии воздействия масел и эмульсий	ГОСТ 1843-378
ПРРП	То же в резиновой оболочке	В осветительных и силовых цепях, вторичных цепях, в экскаваторах, машинах и механизмах при наличии механических воздействий на провод, воздействия масел, эмульсий	То же
ПРФ	Провод с медной жилой, в резиновой изоляции, в фальцованной оболочке из сплава марки АМЦ	В осветительных и силовых сетях в сухих помещениях при наличии легких механических воздействий на провод (проводки в лестничных клетках, клубах, театрах и т. п.)	» »
АПРФ	То же с алюминиевой жилой	То же	» »
ПРФм	То же в оболочке из латуни	» »	» »

Провода с пластмассовой изоляцией

ПВ	Провод с медной жилой и поливинилхлоридной изоляцией	Для монтирования вторичных цепей, прокладки в трубах, пустотных каналах несгораемых строительных конструкций и для монтирования силовых и осветительных цепей в машинах и станках	ГОСТ 6323-71
АПВ	Провод с алюминиевой жилой и поливинилхлоридной изоляцией	То же	То же
ПП	Провод с медной жилой и изоляцией из самозатухающего полиэтилена	» »	» »
АПП	Провод с алюминиевой жилой и изоляцией из самозатухающего полиэтилена	» »	» »
ПГВ	Провод с медной гибкой жилой и поливинилхлоридной изоляцией	Для монтирования вторичных цепей, для гибкого монтажа при скрытой и открытой прокладках	» »
ППВ	Провод с медными жилами и поливинилхлоридной изоляцией, плоский, с разделительным основанием	Для монтирования силовых и осветительных цепей в машинах и станках и для неподвижной открытой прокладки	» »
АППВ	То же с алюминиевыми жилами	То же	» »
ППП	То же с медными жилами и полиэтиленовой изоляцией	» »	» »
АППП	То же с алюминиевыми жилами и полиэтиленовой изоляцией	» »	» »
ППВС	Провод с медными жилами и поливинилхлоридной изоляцией, плоский, без разделительного основания	Для неподвижной скрытой прокладки под штукатуркой, для прокладки в трубах и пустотных каналах несгораемых строительных конструкций	» »
АППВС	То же с алюминиевыми жилами	То же	» »
ПППС	То же с медными жилами и полиэтиленовой изоляцией	» »	» »
АППС	То же с алюминиевыми жилами и полиэтиленовой изоляцией	» »	» »
АВТ	Провод с алюминиевыми жилами, с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, с несущим тросом	Прокладка наружная (для ввода в жилые дома и хозяйственные постройки) в сетях на напряжение 380 В в I и II районах гололедности	ГОСТ 14175-78
АВТУ	То же с усиленным несущим тросом	То же в III и IV районах гололедности	То же
АВТВ	Провод с алюминиевыми жилами, с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, с несущим тросом, для внутренней прокладки	Прокладка внутри помещений (в том числе животноводческих) в сетях на напряжение 380 В	» »
АВТВУ	То же с усиленным несущим тросом	То же, но где требуется повышенная механическая прочность	» »

Продолжение табл. 14-74

Обозначение марок	Наименование элементов проводов	Преимущественные области применения	ГОСТ или ТУ
<i>Провода силовые гибкие (нагревостойкие)</i>			
ПРКА	Провод термостойкий, с медной жилой, в изоляционно-защитной оболочке из кремнийорганической резины повышенной твердости, однопровитный	При фиксировании монтаже внутри осветительной аппаратуры	ТУ 16-505. 317-76
ПВБЛ	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией на основе бутадиенового каучука, в оплетке из лавсановой нити	Для выводов электродвигателей	ГОСТ 16036-79
РКГМ	Провод с медной жилой, с изоляцией из кремнийорганической резины, в оплетке из стекловолны, пропитанной эмалью или термостойким лаком	Для выводов электродвигателей	То же
ПАЛ	Провод с медной жилой, с асбестошлаковой изоляцией, лакированный	Для выводов электродвигателей, для работы в условиях межприборного монтажа	ТУ 16-505. 656-74
ПАЛО	То же облегченный	То же	То же

Таблица 14-75

Номинальные сечения жил, их число и расчетные диаметры силовых проводов с резиновой изоляцией на напряжение 660 В частотой 50 Гц или постоянное напряжение 1000 В

Обозначение марки	Число жил	Номинальное сечение жилы, мм ²	Расчетный наружный диаметр, мм
ПРТО	1	0,75—120	3,7—19,3
	2; 3	1—120	1,5—38,9; 7,9—41,6
	4; 7	1,5—10	9,6—15,8; 11,6—19,9
	10	1,5; 2,5	15,0; 16,5
	14	1,5; 2,5	16,4; 18,6
АПРТО	1; 2; 3	2,5—120	3,7—19,3; 7,5—38,9; 7,9—41,6
	7	2,5—10	11,6—19,9
	1	1,5—120	3,4—18,6; 3,5—21,4
АПРН	1	2,5—120	4,2—18,7
ПРИ	1	0,75—120	3,4—18,6
АПРИ	1	2,5—120	4,2—18,7
ПРГИ	1	0,75—120	3,5—21,4
АППР	2; 4	2,5—10	5×14,0— —7,2×19,4; 12,1—17,3
	3	2,5	5,0×19,0

Таблица 14-76

Номинальные сечения жил, их число и наружные диаметры проводов ПРД, ПРВД, АРТ

Марка	Число жил	Номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр, мм
ПРД	1	0,75—6	6,0—10,2
ПРВД	2	1,0—6	5,8—10,0
АРТ	2	2,5—4	9,0—10,1
	3	4; 6	11,3—12,5
	4	4—35	20,5—31,3

Таблица 14-77

Номинальные сечения основных жил, их число, наружные диаметры и масса проводов ПРП, ПРРП, АПРФ, ПРФ, ПРФЛ

Марка	Число основных жил	Номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр, мм	Масса, кг/км
ПРП	1, 2, 3	1,0—95	5,8—44,0	71,0—4162,0
	4—30	1,0—2,5	10,5—31,0	
ПРРП	1, 2, 3	1,0—95	7,6—48,4	106,0—
	4—30	1,0—2,5	12,8—36,0	—5078,0
АПРФ	1, 2, 3	2,5—4	5,0—11,4	42,0—148,0
ПРФ	1, 2, 3	1,0—4	4,3—11,4	40,0—200,0
ПРФЛ	1, 2, 3	1,0—4	4,2—11,3	64,0—249,0

Таблица 14-78

Наружные диаметры и массы одножильных проводов с пластмассовой изоляцией

Марка	Сечение, мм ²	Диаметр, мм		Масса, кг/км	
		380 В	660 В	300 В	660 В
ПВ	0,5—95	2,0—15,3	2,4—16,1	8—942	10—971
ПП	0,5—95	2,0—15,3	2,4—16,1	7—918	9—939
ПГВ	0,5—95	2,1—17,3	2,5—17,7	9—979	11—1012
АПВ	2,5—120	3,4—16,9	3,4—17,7	16—423	16—456
АПП	2,5—120	3,4—16,9	3,4—17,7	13—397	13—421

Таблица 14-79

Наружные размеры и массы двух- и трехжильных плоских проводов с пластмассовой изоляцией на напряжение 380 В

Марка	Число жил и сечение	А×В*, мм	Масса, кг/км
ППВ	(2×0,75)— —(3×4)	(2,2×9,4)— —(3,8×16,4)	25—173 22—153
АППВ	(2×2,5)—(3×6)	(3,4×11,7)— (4,4×18,2)	34—91 29—80
ППВС	(2×0,75)— —(3×4)	(2,2×4,4)— (3,8×11,4)	22—156 19—151
АППВС	(2×2,5)—(3×6)	(3,4×6,8)— (4,3×13,0)	31—85 27—75

* А и В — толщина и ширина плоского провода.

Таблица 14-81

Номинальное сечение, число жил и наружный диаметр проводов АВТ, АВТУ, АВТВ, АВТВУ

Марка	Число жил	Номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр, мм
АВТ	2, 3, 4	2,5	8,2; 9,2; 10,3
АВТУ	2, 3, 4	4	10,1; 11,3; 12,7
	4	6; 10; 16	14,0; 17,3; 21,4
АВТВ	2, 3, 4	2,5	7,0; 7,9; 8,7
АВТВУ	2, 3, 4	4	8,4; 9,4; 10,5
	4	6; 10; 16	11,9; 15,0; 19,2

Таблица 14-82

Типы, марки, наименования и области применения бытовых соединительных проводов и шнуров (ГОСТ 7399-80)

Тип	Марка	Сечение жилы, мм ²	Наименование	Преимущественные области применения
Плоский без оболочки	ШПП	0,20	Шнур с ПЭ изоляцией, с параллельными жилами, без разделительного основания, слаботочный на напряжение до 100 В	Для абонентских громкоговорителей, если шнур редко подвергается механическим деформациям
	ШВП-1	0,35—0,75	Шнур с ПВХ изоляцией, с параллельными жилами, без разделительного основания, на напряжение до 380 В	Для радиоприемников, телевизоров, паяльников и других подобных приборов, если шнур подвергается механическим деформациям
	ШВП-2	0,35—0,75	То же гибкий	Для настольных, настенных и напольных светильников, вентиляторов, магнитофонов, удлинителей-разветвителей и других подобных приборов, если шнур часто подвергается легким механическим деформациям
	ШВП-3	0,75	Шнур с ПВХ изоляцией, с параллельными жилами, с разделительным основанием, на напряжение до 380 В	Для бытовых холодильников и других подобных приборов, если шнур редко подвергается механическим деформациям
	ШВП-4	0,75	То же гибкий	То же
Круглый без оболочки	ШВГТ	0,35	Шнур с ПВХ изоляцией, с параллельными жилами, теплостойкий на напряжение до 48 В	Для переносных ламп автомобилей
Легкий с оболочкой	ШВВП	0,35—1,0	Шнур гибкий с ПВХ изоляцией, в ПВХ оболочке, плоский на напряжение до 380 В	То же, что ШВП-2
	ШВЛ	0,5—0,75	Шнур гибкий со скрученными жилами, с ПВХ изоляцией в ПВХ оболочке, на напряжение до 380 В	Для бытовых полотеров, пылесосов, напольных отопительных приборов и других подобных машин и приборов, если шнур подвергается действию влаги в условиях легких механических воздействий

Продолжение табл. 14-82

Тип	Марка	Сечение жилы, мм ²	Наименование	Преимущественные области применения
Обычный оболочкой	с ШРО	0,35—1,0	Шнур гибкий со скрученными жилами, с резиновой изоляцией, в оплетке из хлопчатобумажной или синтетической нитки, на напряжение до 220 В	Для утюгов домашнего обихода, кофеварок, чайников, грелок и других подобных приборов, если шнур часто подвергается легким механическим деформациям
	ШРС	0,5—0,75	Шнур гибкий со скрученными жилами, с резиновой изоляцией, в резиновой оболочке, на напряжение до 380 В	Для бытовых электроплиток, полотеров, пылесосов, напольных отопительных приборов, утюгов, если шнур подвергается действию влаги в условиях легких механических воздействий
	ШТР	0,5—1,5	Шнур повышенной гибкости, термостойкий, со скрученными жилами, с изоляцией и в оболочке из кремнийорганической резины, на напряжение до 220 В	Для утюгов домашнего обихода и промышленного применения, электроплиток и других подобных приборов, если шнур подвергается легким механическим деформациям и нагреву
	ШПС	0,5—0,75	Шнур со скрученными жилами, с ПВХ изоляцией, в ПВХ оболочке, подвесной грузонесущий, на напряжение до 220 В	Для светильников, подвешиваемых на электрическом шнуре
	ПРС	0,5—2,5	Провод гибкий со скрученными жилами, с резиновой изоляцией и оболочкой, на напряжение до 380/660 В	Для полотеров, пылесосов, стиральных машин, электрорадиаторов, удлинителей, бойлеров и других подобных машин и приборов, если провод подвергается истиранию и действию влаги в условиях средних механических воздействий
	ПВС	0,5—2,5	Провод гибкий со скрученными жилами, с ПВХ изоляцией, в ПВХ оболочке, на напряжение 380/660 В	То же

Таблица 14-83

Сортамент соединительных шнуров для бытовых электрических машин и приборов

Марка	Число жил в шнуре при сечении, мм ²							
	0,20	0,35	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	4,0
ШБПВ	—	2	2	2	—	—	—	—
ШПП	2	—	—	—	—	—	—	—
ШБКВ	—	2	2	2	—	—	—	—
ШБКР	—	—	2	2	—	—	—	—
ШБРО	—	—	2; 3	2; 3	2; 3	—	—	—
ШБВВП	—	—	2; 3	2; 3	2	—	—	—
ШБЛВГ	—	2	2	2	—	—	—	—
ШБТР	—	—	2; 3	2; 3	2; 3	2	—	—
ШБТРО	—	—	2; 3	2; 3	2; 3	2; 3	—	—
ШБВЛ	—	—	2; 3	2; 3; 4	2; 3; 4	2; 3; 4	—	—
ШБВС	—	—	—	2; 3; 4	2; 3; 4	2; 3; 4	2; 3; 4	2; 3; 4
ШБВЛ	—	—	2; 3	2; 3; 4	2; 3; 4	2; 3; 4	—	—
ШБРС	—	—	—	2; 3; 4	2; 3; 4	2; 3; 4	2; 3; 4	2; 3; 4
ШБПС	—	—	2; 3	2; 3	—	—	—	—

резиновой изоляцией — до 180°С, с пластмассовой изоляцией — до 70°С. Монтаж проводов допустим при температуре не ниже 15°С.

Соединительные шнуры предназначены для присоединения различных бытовых электрических машин, приборов, радиоаппаратуры, телевизоров и других подвижных и неподвижных установок к электрическим сетям переменным напряжением до 660 В (табл. 14-82 и 14-83). Длительно допустимая температура нагрева токопроводящих жил 65°С — шнуров с резиновой изоляцией, 70°С — шнуров с изоляцией из поливинилхлоридного пластика, 150°С — шнуров с изоляцией из кремнийорганической резины и эксплуатации при температуре окружающей среды от —40 до +40°С (для ШВПТ — до +90°С).

14-9. МОНТАЖНЫЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА

Монтажные кабели и провода применяются для осуществления электрических соединений в приборах, аппаратах и других электрических устройствах, радиотехнических и иных схемах. Большое количество марок этих проводов связано с разнообразием условий их применения. В целом их можно разделить на провода обычной и повышенной нагревостойкости. За повышенную температуру принимают температуру наиболее нагретой точки в кабеле. Для проводов обычной нагревостойкости ниже приведены подробный ассортимент и характеристики. Провода повышенной нагревостойкости изготавливаются по отдельным техническим условиям и для них будут приведены только маркировка и основные характеристики. Бо-

Таблица 14-84

Число жил и номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр кабеля, мм, не более			
	МКШ	МКЭШ	МПКШ	МПКЭШ
2×0,35	6,7	7,5	6,1	6,9
3×0,35	6,9	7,7	6,4	7,2
5×0,35	8,2	9,0	7,6	8,4
7×0,35	8,8	9,9	8,2	9,0
10×0,35	11,6	12,4	10,8	11,6
14×0,35	12,4	13,2	11,6	12,4
2×0,5	7,0	7,8	6,6	7,4
3×0,5	7,2	8,0	6,7	7,5
5×0,5	8,5	9,5	8,0	8,8
7×0,5	9,2	10,0	8,6	9,4
10×0,5	12,2	13,0	11,4	12,2
14×0,5	13,1	13,9	12,2	13,0
2×0,75	7,5	8,3	7,1	7,9
3×0,75	7,7	8,5	7,3	8,1
5×0,75	9,2	10,0	8,7	9,5
7×0,75	10,0	10,8	9,4	10,2
10×0,75	13,2	14,0	12,4	13,2
14×0,75	14,2	15,0	13,3	14,1

более подробные сведения о них можно найти в рекомендуемой литературе.

Монтажные кабели (ГОСТ 10348-71) с медными жилами (проволоки луженые) и пластмассовой изоляцией в поливинилхлоридной оболочке предназначены для фиксированного монтажа при переменном напряжении 500 В частотой до 400 Гц или постоянном 750 В. Кабели изготавливаются марок: МКШ — с изоляцией из поливинилхлоридного пластика; МКЭШ — то же, экранированные оплеткой из медной проволоки; МПКШ — с изоляцией из полиэтилена; МПКЭШ — то же экранированный.

Ассортимент этих кабелей приведен в табл. 14-84. Электрическое сопротивление изоляции при 20°С, не менее: 10⁴ МОм·м — для марок МКШ, МКЭШ и 10⁵ МОм·м — для марок МПКШ, МПКЭШ.

Кабели стойки к следующим воздействиям: вибрационным нагрузкам до 200 м/с² при частоте 1—2000 Гц, многократным ударным нагрузкам с ускорением до 1500 м/с² и длительностью до 3 мс, температуре от —50 до +70°С, влажности 98% при температуре 40°С; срок службы кабелей 12 лет.

Монтажные кабели (ГОСТ 17301-79) *малозабиритные* с медными жилами (проволоки луженые) с пластмассовой изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластика предназначены для фиксированного монтажа, кабели с полиэтиленовой изоляцией могут работать при частотах до 200 кГц, кабели с изоляцией из поливинилхлоридного пластика — до 400 Гц.

Кабели должны изготавливаться следующих марок: КМПВ — кабель с полиэтиленовой изоляцией в поливинилхлоридной оболочке; КМПВЭ — то же в общем экране; КМПВЭВ — то же в поливинилхлоридной оболочке; КМПЭВ — кабель с полиэтиленовой изоляцией с экранированными, частично экранированными или попарно экранированными жилами, в поливинилхлоридной оболочке; КМПЭВЭ — то же в общем экране; КМПЭВЭВ — то же в защитной по-

ливинилхлоридной оболочке; КМВВЭ — кабель с поливинилхлоридной изоляцией в поливинилхлоридной оболочке, в общем экране (табл. 14-85).

Кабели стойки к следующим воздействиям: температура от —50°С до +65°С; наличие паров и брызг масла и бензина; электрическое сопротивление изоляции жил при 20°С при приемке и поставке: для полиэтиленовой изоляции 10⁶ МОм·м, для поливинилхлоридной изоляции 5·10³ МОм·м; на период эксплуатации и хранения, а также к концу срока службы: для полиэтиленовой изоляции 10⁵ МОм·м, для поливинилхлоридной изоляции 10³ МОм·м. Рабочая емкость 1 м кабеля всех марок за исключением КМВВЭ должна быть не более: для пары неэкранированных жил 100 пФ, для одиночно-экранированной жилы 260 пФ. Срок эксплуатации — 20 лет внутри помещений. Кабели должны выдерживать вибрационные нагрузки с частотой 5 кГц и ускорением до 400 м/с²; многократные удары с ускорением до 1500 м/с²; одиночные удары с ускорением до 10 000 м/с²; линейные нагрузки до 5000 м/с²; акустические шумы частотой до 10 кГц при уровне звукового давления до 160 дБ. Кабели должны быть стойки к воздействию многократных изгибов. Кабели должны быть герметичны в радиальном направлении при воздействии внешнего давления воды до 5,9 МПа.

Монтажные провода (ГОСТ 17515-72) с медными лужеными жилами с изоляцией из поливинилхлоридного пластика или полиэтилена в капроновой оболочке или без оболочки предназначены для работы при переменном напряжении до 1000 В частотой до 5000 Гц или постоянном до 1400 В в цепях электротехнических устройств общепромышленного применения. Провода в капроновой оболочке предназначены для применения в условиях повышенных механических воздействий.

Вторая буква маркировки означает: В — поливинилхлоридная изоляция, П — полиэтиленовая изоляция. Последующие буквы означают: К — капроновая оболочка; Э — экран в виде оплетки из медной проволоки. Пример маркировки: НВКЭ — провод монтажный низковольтный с изоляцией из поливинилхлоридного пластика в капроновой оболочке экранированный.

Ассортимент и наружный диаметр проводов приведены в табл. 14-86 и 14-87. Электрическое сопротивление изоляции не менее 10³ и 10⁵ МОм·м для проводов с полихлорвиниловой и полиэтиленовой изоляцией в нормальных условиях, при рабочей температуре соответственно 10² и 10⁴ МОм·м.

Провода стойки к следующим воздействиям: температура от —50 до +70°С для проводов с поливинилхлоридной изоляцией, от —60 до +85°С для проводов с полиэтиленовой изоляцией, от —50 до +85°С для проводов с полиэтиленовой изоляцией в капроновой оболочке; вибрационные на-

Таблица 14-85

Марка кабеля	Номинальное сечение жилы, мм ²	Число жил	Номинальное напряжение, В
КМПВ	0,35—1,5	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37, 52	500
	2,5	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	500
	0,5—2,5	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	1000
КМПВЭ КМПВЭВ	0,35—1,5	2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37, 52	500
	2,5	2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	500
	0,5—2,5	2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	1000
КМПЭВ	0,35—1,5	2, 3, 4, 7, 12, 14, 19, 24, 27, 37, 52	500
КМПЭВЭ КМПЭВЭВ	0,35—0,5	12/8Э*, 17/11Э*, 27/13Э*, 39/24Э*, 50/22Э*	500
	0,75	16×2Э**, 19×2Э**, 37×2Э**	500
	1,5	4, 7, 12, 19, 27, 37, 52	1000
КМВЭВ	0,75—1,5	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12	500
	2,5—1,0	1, 2, 3	

* Числитель указывает общее число жил, знаменатель — число экранированных жил из общего их количества.

** Кабель с попарно экранированными жилами.

грузки с ускорением до 100 м/с² с частотой до 600 Гц и многократные удары с ускорением до 350 м/с², влажность 98% при 40°С; провода должны быть стойкими к воздействию бензина, минерального масла и плесневых грибов. Срок службы проводов 10 лет; ресурс работы при максимальных рабочих температурах 1000 ч.

Монтажные провода (ГОСТ 10349-75) **одножильные** с медными лужеными и нелужеными проволоками с волокнистой изоляцией предназначены преимущественно для фиксированного монтажа.

Марки проводов и их конструкции приведены в табл. 14-88, а их ассортимент и наружный диаметр — в табл. 14-89.

Провода предназначены для эксплуатации при —80÷+105°С. Провода могут иметь 22 вида расцветки.

Электрическое сопротивление изоляции проводов при 20°С не меньше указанного в табл. 14-90 (для провода МГШ не нормируется). Эти провода не рекомендуется применять в условиях, когда возможна конденсация влаги на поверхность проводов.

Монтажные провода с комбинированной волокнистой и полихлорвиниловой или полиэтиленовой изоляцией (самозатухаю-

щий полиэтилен) имеют при сечении жил 0,08—0,14 мм рабочее напряжение до 380 В (2000 Гц), а при сечении 0,2—1,5 мм — 1000 В или соответственно 500 и 1500 В при постоянном напряжении. Ассортимент и наружные диаметры проводов приведены в табл. 14-91.

Изготавливаются следующие марки: МШВ — монтажный провод с волокнистой и поливинилхлоридной изоляцией; МГШВ — то же гибкий; МГШВЭ — то же экранированный; МГШВЭВ — экран в поливинилхлоридной оболочке.

С полиэтиленовой изоляцией соответственно изготавливаются провода марок МШП, МГШП, МГШПЭ. Кроме того, вместе с волокнистой изоляцией может применяться пленочная изоляция (марки МШВ-1, МГШВ-1, МГШВЭ-1). В проводах марок МПГС, МППСО, МПГСЭ применяется стекловолнистая изоляция. Провода марок МППСО и МПГСЭ имеют общую оплетку из стекловолокна, сечение жил 0,35 и 0,50 мм², число жил 10, 20, 30 и 50. Все эти провода могут работать при температурах от —50 (ПВХ) и —60 (ПЭ) до +70°С, влажности 98% при +40°С, давлении от 666 Па до 0,3 МПа и при вибрационных воздействиях. Ресурс работы при

Таблица 14-86

Наружные диаметры, мм (не более), проводов на напряжение 500 В

Сечение жилы, м²	НВ	НП	НВЭ	НПЭ	НВЭ	НПЭ	НВК	НПК	НВКЭ	НПКЭ	НВКЭ	НПКЭ
			Число жил		Число жил				Число жил		Число жил	
			1		2	3			1		2	3
0,08	1,2	1,2	—	—	—	—	1,5	1,5	—	—	—	—
0,12	1,3	1,3	1,8	1,8	3,2	3,4	1,6	1,6	2,1	2,1	3,8	4,1
0,20	1,5	1,5	2,0	2,0	3,6	3,8	1,8	1,8	2,3	2,3	4,2	4,5
0,35	1,6	1,6	2,2	2,2	3,8	4,1	1,9	1,9	2,5	2,5	4,4	4,7
0,50	1,8	1,8	2,3	2,3	4,2	4,5	2,1	2,1	2,7	2,7	4,8	5,1
0,75	2,1	2,1	2,7	2,7	4,8	5,1	2,3	2,3	2,9	2,9	5,2	5,6
1,0	2,2	2,2	2,8	2,8	5,0	5,3	2,4	2,4	3,0	3,0	5,4	5,8
1,5	—	2,5	—	3,1	—	—	—	2,8	—	3,4	—	—
2,5	—	3,2	—	3,8	—	—	—	3,4	—	4,0	—	—

Таблица 14-87

Таблица 14-89

Наружные диаметры, мм (не более), проводов на напряжение 1000 В

Сечение жилы, мм ²	НВ	НВЭ			НВК	НВКЭ		
		Число жил				Число жил		
		1	2	3		1	2	3
0,08	1,4	—	—	—	1,7	—	—	—
0,12	1,5	2,0	3,6	3,8	1,8	2,3	4,2	4,5
0,20	1,7	2,2	4,0	4,3	1,9	2,4	4,4	4,7
0,35	1,8	2,4	4,2	4,5	2,1	2,7	4,8	5,1
0,50	2,0	2,5	4,6	4,9	2,2	2,8	5,0	5,3
0,75	2,3	2,9	5,2	5,6	2,5	3,1	5,6	6,0
1,0	2,4	3,0	5,4	5,8	2,6	3,2	5,8	6,2

Таблица 14-88

Наружные диаметры проводов

Сечение жилы, мм ²	Максимальный наружный диаметр провода, мм							
	МШДЛ	МЭШДЛ	МГШ	МГШДОП	МГШДО	МГШДЛ	МГСЛ	МГСЛЭ
	МШДЛ	МЭШДЛ	МГШ	МГШДОП	МГШДО	МГШДЛ	МГСЛ	МГСЛЭ
0,05	—	—	0,6	1,0	1,0	0,8	—	—
0,08	—	—	0,7	1,1	1,1	0,9	—	—
0,12	1,0	1,0	0,8	1,2	1,2	1,0	—	—
0,20	1,1	1,1	—	1,3	1,3	1,3	1,6	2,2
0,35	1,3	1,3	—	1,5	1,5	1,4	1,8	2,4
0,50	1,4	1,4	—	1,6	1,6	1,5	1,9	2,5
0,75	1,6	1,6	—	1,8	1,8	—	2,1	2,7
1,0	—	—	—	1,9	1,9	—	2,0	2,9
1,5	—	—	—	2,3	2,3	—	2,6	2,2
2,5	—	—	—	2,7	2,7	—	—	—

Таблица 14-90

Одножильные монтажные провода

Обозначение марок	Наименование проводов	Номинальное переменное напряжение, В
МШДЛ	Однопроволочный с двойной обмоткой из капроновой нити лакированный	220
МЭШДЛ	То же, но жила эмалированная	220
МГШ	Многopроволочный в оплетке из капроновой нити	24
МГШД	Многopроволочный с двойной обмоткой из капроновой нити	60
МГШДО	Многopроволочный с двойной обмоткой и оплеткой из капроновой нити	127
МГШДОП	Многopроволочный с двойной обмоткой и подкладной оплеткой из капроновой нити	127
МГШДЛ	Многopроволочный с двойной обмоткой из капроновой нити лакированный	220
МГСЛ	Многopроволочный с двойной обмоткой в оплетке из стекловолокна лакированный	127
МГСЛЭ	То же экранированный	127

Марка проводов	Относительная влажность воздуха, %, при 20°C	Электрическое сопротивление, МОм·м
МЭШДЛ	95±3	1000
МШДЛ, МГШДЛ	95±3	300
МГСЛ, МГСЛЭ	80±3	10
МГШД, МГШДО, МГШДОП	65±3	100

Таблица 14-91

Число жил и их сечение, мм ²	Наружный диаметр проводов, мм, не более					
	МШВ, МШП	МГШВ, МГШП	МГШВЭ	МГШПЭ	МГШВЭВ	МГПС
0,08	1,0	—	—	—	—	—
0,12	—	1,3	—	1,9	—	—
0,14	—	1,4	—	2,0	—	—
0,20	1,6	1,6	—	2,2	—	1,8
0,35	1,9	1,9	—	2,5	3,5	2,0
0,5	2,0	2,2	—	2,8	—	2,1
0,75	2,3	2,5	—	3,3	—	2,6
1,0	2,6	2,8	—	3,6	—	—
1,5	2,7	3,0	—	3,8	—	—
2×0,35	—	—	4,6	—	—	—
2×0,5	—	—	5,2	—	—	—
2×0,75	—	—	5,8	—	—	—
3×0,35	—	—	4,9	—	—	—
3×0,5	—	—	5,4	—	—	—
3×0,75	—	—	6,8	—	—	—

Примечание. Для изоляции лакированных проводов марок МШДЛ, МЭШДЛ, МГШДЛ допускается применение лавсановой нити.

Таблица 14-92

Марка проводов	Изоляция	Напряжение, В (в скобках частота, Гц)		Диапазон сече- ний жил, мм ²	Диапазон числа жил	Максимальная рабочая темпера- тура, °С	Кратковременно- допустимая тем- пература (или до- пустимая 1 раз)	Минимальное давление, Па
		перемен- ное	постоян- ное					
МРК, МРКЭ, МРКТ, МРКЭ-Т	Кремнийоргани- ческая резина, оплет- ка лавсаном (Т—тро- пическое исполнение)	660 (400)		0,75—120	1	105	—	—
КМПОВ, КМПОВЭ, КМПОВЭ, КМПОВЭВ	Облученный поли- этилен, полвинил- хлоридная оболочка с различной степенью экранирования	100 (10 ⁶) 250 (10 ⁶)		0,08—0,2 0,12—0,35	4—52	100	200	10 ⁻³
МПО, МПОУ, МПОЭ, МПОУЭ	Облученный поли- этилен (У — жилы повышенной меха- нической прочности)	220 (2000) 160 (4·10 ⁶)		0,12—0,75	7—49	100	200	10 ⁻⁴
МСТП, МСТПГ, МСТПЛ, МСТПЭ	Стекловолокно, об- лученный термостра- ционно-стойкий по- лиэтилен	250 (1000) (сечение до 0,12 мм ²)		0,08—6,0	1	150	200	—
МЛТП, МЛТПЭ, МЛТПГ	То же, но вместо стекловолокна лав- сан	500 (1000)				100	150	—
МЛП, МЛПЭ, МЛПГ	То же, но поли- этилен стабилизиро- ванный	380 (1000)						
СФ, СФЭ, СФУ, СФУЭ	Стекловолокно, фторопласт	380 (5000)		0,2—2,5	4—52	250	400	—
КСФС, КЭСФЭ				0,2—1,5				
МФОЛ, МФЭ	Стекловолокно, фторопласт	250 (5000)	—	0,2	7—20	200	—	—
Ф, ГФ, ФЭ, ГФЭ	Фторопласт, про- волока посеребрен- ная	500 (5000)	700	0,08—1,5	1	250	—	—
ГФН-100, ГФН-250, ГФМЭ-250, МГФМ	Фторопласт-4Д	100 (5000), 250 (5000)	350	0,08—0,35	1	200	—	—
ФД-500, ФДЭ-500, ФДЭД-500	То же	500 (10 ⁴)	700	0,05—2,5	1—4	200	250	—
ФДЭ-250, ФД-250, ФДЭД-250	То же	250 (10 ⁴)	350	0,05—2,5	1—3	200	250	—
ПВТФ, ПВТФЭ	Ленты фторопла- ста с промазкой кремнийорганиче- ской жидкостью. Оп- летка стекловоло- кном	5000 (50)	—	0,12—1,5	1	200	—	—
ПВСФ, ПВСФЭ	Стекловолокно+ обмотка из лент фторопласта	1000 (400), 2000 (400)	—	0,5—6	1	300	350	—
ПМОФ	Фторопластовые ленты+оплетка из лавсановых нитей. Особо гибкий	250 (2000)	—	0,35—0,5	1	100	—	—

максимально жестких условиях 1000 ч, срок службы 12 лет.

Аналогичные характеристики имеют облученные провода марок МПСПО и МПСПОЭ, которые изготавлиются с сечением жил от 0,12 до 1,5 мм² и числом жил 1, 2, 3. Они имеют меньший диаметр и рассчитаны на напряжение 250 В (2000 Гц).

Монтажные провода высоковольтные МПВ-2 с полиэтиленовой изоляцией и поливинилхлоридной оболочкой, рассчитанные на напряжение 2 кВ (500 Гц) и 5 кВ при постоянном напряжении, изготавливаются с жилами следующих сечений:

Сечение жилы, мм ²	0,12	0,35	0,75
Наружный диаметр, мм	1,7	2,0	2,7

Провода могут работать при температуре от -60 до +85°С, влажности 98% при +40°С, давлении до 666 Па и воздействиях вибрационных нагрузок.

Кабели и провода повышенной нагревостойкости изготавливаются с применением изоляции из сшитого путем облучения полиэтилена, кремнийорганической резины, фторопластов и комбинации стекловолокна с фторопластовой пленкой.

Все эти кабели и провода вибрационно-стойкие, рассчитаны на применение при влажности до 98% при 40°С, минимальная температура эксплуатации -60°С.

Основные сведения об этих кабелях и проводах приведены в табл. 14-92. Более подробные сведения можно найти в [14-6, 14-7].

14-10. ОБМОТОЧНЫЕ ЭМАЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА

Эмалированные провода удобно классифицировать по температурному индексу (ТИ), т. е. по температуре, °С, при которой провода сохраняют определенные свойства в течение базового ресурса 20 000 ч (см. § 9-2). Сведения о температурных индексах и конструктивных данных основных типов медных эмалированных проводов приведены в табл. 14-93.

Эмалированные провода для электротехнического оборудования класса нагревостойкости А (ТИ 105) выпускаются как с изоляцией на основе масляных лаков — провод марки ПЭЛ, так и на основе синтетических лаков — провода марок ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1 и ПЭМ-2. Провода марки ПЭЛ имеют наименьшую толщину изоляции, обладают хорошими электроизоляционными характеристиками, однако механические свойства эмаливой изоляции и ее стойкость к растворителям невысокие. Поэтому эти провода применяются в основном для намотки катушек электрических аппаратов, рамок приборов и т. п. Для обмоток электрических машин эти провода могут применяться только при условии наложения на слой эмали обмотки из хлопчатобумажной, шелковой или синтетической пряжи.

Наиболее массовыми проводами, при-

меняемыми для электрических машин и аппаратов в системах изоляции класса нагревостойкости А, являются провода с изоляцией на основе поливинилацеталевых смол марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2, эмалированные поливинилформальдегидальевым лаком «винилфлекс», и марок ПЭМ-1 и ПЭМ-2, эмалированные поливинилформальдевым лаком «метальвин». Важнейшими преимуществами этих проводов перед проводами марки ПЭЛ являются высокая механическая прочность изоляции и ее высокие адгезионные свойства, что позволяет использовать провода для обмоток электрических машин без наложения дополнительного слоя волокна. Кроме того, провода, эмалированные лаками на основе поливинилацеталевых смол, достаточно устойчивы к действию ароматических растворителей (бензол, толуол, ксилол). Провода марок ПЭВ и ПЭМ имеют фактически равноценные электроизоляционные и физико-механические характеристики. Однако провода марки ПЭМ значительно превосходят провода ПЭВ по стойкости к воздействию трансформаторного масла, что позволяет применять их для обмоток масляных трансформаторов. Кроме того, существенным преимуществом проводов марки ПЭМ является их повышенная стойкость к таким хладагентам, как фреон-12 и фреон-22. Провода, эмалированные лаком «метальвин», предназначенные для работы в обмотках электродвигателей холодильных аппаратов, маркируются ПЭМФ.

Для систем изоляции класса нагревостойкости Е выпускаются обмоточные провода с изоляцией на основе полиуретанового лака — провода марок ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2 (ТИ 120). Особенностью этих проводов являются термопластичные свойства изоляционного слоя (температура размягчения 160°С), что ограничивает область их применения. Провода марок ПЭВТЛ предназначены для применения в приборостроительной, аппаратной и радиотехнической промышленности, эти провода могут также использоваться для обмоток электродвигателей малой мощности. Основным преимуществом этих проводов является способность обслуживаться без предварительной зачистки изоляции.

Провода с температурным индексом 130 (системы изоляции класса нагревостойкости В) изолируются полиэфирными (полиэтилентерфталатными) лаками. В зависимости от типа применяемого лака провода маркируются: ПЭТВ — с изоляцией на основе лака ПЭ-943, ПЭТВ-939 — на основе лака ПЭ-939, ПЭТВ-ТС — с изоляцией, наложенной из расплава полиэфирного продукта марки ТС.

Провода с изоляцией на основе полиэфиров обладают хорошими электроизоляционными и физико-механическими свойствами. К недостаткам проводов следует отнести пониженную стойкость к кратковременным тепловым перегрузкам (быстрое увеличение температуры до 180—200°С) — так называемым «тепловым ударами».

Таблица 14-93

Нагревостойкость и конструктивные данные основных типов круглых медных эмалированных проводов

Марка провода	Номинальный диаметр токопроводящей жилы, мм	Минимальная диаметральной толщина изоляции, мм	Температурный индекс, °С	Действующая техническая документация
ПЭЛ	0,02—2,50	0,004—0,006	105	ГОСТ 2773-78
ПЭВ-1	0,02—2,50	0,006—0,035	105	ГОСТ 7262-78
ПЭВ-2	0,05—2,50	0,012—0,070		
ПЭМ-1	0,05—2,50	0,020—0,100	105	ГОСТ 10288-74
ПЭМ-2	0,05—2,50	0,030—0,130		
ПЭМФ	0,25—0,95	0,030—0,050	105	ТУ 16.505.583-77
ПЭВБЖ	0,02—0,050	0,004—0,008	105	ТУ 16.505.366-72
ПЭВД, ПЭВДБ	0,10—0,51	0,015—0,035	105	ТУ 16.505.320-78
ПЭВТЛ-1	0,02—1,60	0,002—0,04	120	ТУ 16.505.446-77
ПЭВТЛ-2	0,02—1,60	0,004—0,06		
ПЭВТЛН-1	0,02—1,60	0,002—0,04	120	ТУ 16.505.446-77
ПЭВТЛН-2	0,02—1,60	0,004—0,06		
ПЭВТЛК	0,06—0,355	0,025—0,050	120	ТУ 16.505.480-73
ПЭТВ	0,06—2,50	0,010—0,07	130	ОСТ 16.0.500.001-74
ПЭТВ-939	0,06—2,50	0,010—0,07	130	ОСТ 16.0.500.001-74
ПЭТВ-ТС	0,06—2,50	0,010—0,07	130	ОСТ 16.0.500.001-74
ПЭТВМ	0,25—1,40	0,035—0,065	130	ТУ 16.505.370-78
ПЭТВ-Р	0,02—0,20	0,006—0,015	130	ТУ 16.505.373-72
ПЭТ-155	0,06—2,50	0,010—0,070	155	ГОСТ 21428-75
ПЭТМ	0,53—1,32	0,033—0,060	155	ТУ 16.505.935-76
ПЭФ-155	0,063—1,60	0,008—0,070	155	ТУ 16.505.673-76
ПЭТ-200	0,50—2,50	0,035—0,070	200	ТУ 16.505.937-76
ПНЭТ-имид	0,030—2,50	0,003—0,05	240	ТУ 16.505.489-78

В последнее время созданы провода марки ПЭТВМ с изоляцией на полиэфирной основе, предназначенные для механизированной намотки электродвигателей. Для изолирования этих проводов применяется лак ПЭ-939. Провода марки ПЭТВМ имеют несколько увеличенную толщину изоляции, что обеспечивает необходимую механическую прочность изоляции, которая требуется при механизированной намотке, так как при этом возникают дополнительные механические воздействия на провода (растяжение, многократные перегибы, удары, рывки, трение о металлические поверхности и т. п.).

Для систем изоляции класса нагревостойкости F (ТИ 155) созданы эмалированные провода марок ПЭТ-155, ПЭТМ и ПЭФ-155.

Провод марки ПЭТ-155 предназначен для массового применения в электромашиностроении. Провод изолирован лаком на полиэфиримидной основе, обладает высокой стойкостью к тепловому удару, хорошими электроизоляционными свойствами. Однако механические свойства изоляционного слоя недостаточно высоки, что не позволяет использовать провода для механизированной намотки. Для механизированной намотки рекомендуется использовать провод марки ПЭТМ с изоляцией на основе полиэфирциануратимидов (лак ПЭ-999) или на полиэфирамидимидной основе либо провод марки ПЭФ-155 с изоляцией на полиэфирциануратимидной основе. Последний провод обладает повышенной стойкостью к действию холодильных агентов.

Для работы при 180—200°С можно рекомендовать провод марки ПЭТ-200 с

изоляцией на основе полиамидимидов, который обладает высокими электрическими и физико-механическими свойствами.

Для работы при 220—240°С рекомендуется провод марки ПНЭТимид, имеющий биметаллическую жилу медь—никель (никель наносится гальваническим способом) и изоляционную пленку на основе полиимидного лака марки ПАК-1. Провод обладает высокой нагревостойкостью, стойкостью к тепловому удару, хорошими электроизоляционными свойствами, однако имеет пониженную механическую прочность изоляции на истирание.

Для рабочих температур 300—600°С используют биметаллические проводники, изолированные тонкими неорганическими покрытиями в комбинации с органическими пропитками. Это, например, минеральная изоляция состава типа $K_2O \cdot PbO \cdot SiO_2$, условно называемая керамической, или так называемая стекломаль $SiO_2 \cdot PbO \cdot B_2O_3$. Для пропитки изоляции и ее поверхностного покрытия используется органосиликатный состав. Провода маркируются ПЭЖБ и ПЭЖБ-700. Провод ПЭЖБ имеет биметаллическую жилу медь—никель и может использоваться для кратковременной работы при 600°С, провод ПЭЖБ-700 в качестве проводника имеет биметалл серебро—никель и выдерживает кратковременное воздействие 700°С.

Промышленно выпускаются также эмалированные провода, обладающие некоторыми специфическими свойствами.

Тончайшие эмалированные провода диаметром 0,02—0,05 мм выпускаются с изоляцией на основе поливинилацеталевых

Таблица 14-94

Расчетные размеры круглых эмалированных проводов с полиэфирной изоляцией

Номинальный диаметр проволоки, мм	Максимальный наружный диаметр провода, мм	Номинальный диаметр проволоки, мм	Максимальный наружный диаметр провода, мм	Номинальный диаметр проволоки, мм	Максимальный наружный диаметр провода, мм	Номинальный диаметр проволоки, мм	Максимальный наружный диаметр провода, мм
0,063	0,090	0,224	0,280	0,750	0,840	1,400	1,510
0,071	0,100	0,250	0,300	0,800	0,890	1,500	1,610
0,080	0,110	0,280	0,330	0,850	0,940	1,600	1,710
0,090	0,120	0,315	0,370	0,900	0,990	1,700	1,810
0,100	0,130	0,355	0,420	0,950	1,040	1,800	1,920
0,112	0,140	0,400	0,460	1,000	1,110	1,900	2,020
0,125	0,155	0,450	0,510	1,060	1,170	2,000	2,120
0,140	0,170	0,500	0,560	1,120	1,230	2,120	2,250
0,160	0,200	0,560	0,680	1,180	1,290	2,240	2,370
0,180	0,220	0,630	0,700	1,250	1,360	2,360	2,490
0,200	0,240	0,710	0,790	1,320	1,430	2,500	2,630

Таблица 14-95

Номинальный размер a проволоки, мм	Максимальный размер эмалированного провода A , мм	Максимальный размер эмалированного провода B при номинальном размере проволоки b , мм																
		2,00	2,24	2,50	2,80	3,15	3,55	4,00	4,50	5,00	5,60	6,30	7,10	8,00	9,00	10,00	11,20	12,50
0,80	0,94	2,16	2,40	2,66	2,96	3,31	3,71	4,16	4,66	5,19	5,79	6,49	—	—	—	—	—	—
0,90	1,05	2,16	2,40	2,66	2,96	3,31	3,71	4,16	4,66	5,19	5,79	6,49	7,29	—	—	—	—	—
1,00	1,15	2,16	2,40	2,66	2,96	3,31	3,71	4,16	4,66	5,19	5,79	6,49	7,29	8,19	—	—	—	—
1,12	1,27	2,16	2,40	2,66	2,96	3,31	3,71	4,16	4,66	5,19	5,79	6,49	7,29	8,19	9,19	—	—	—
1,25	1,41	2,17	2,41	2,67	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	—	—
1,40	1,56	2,17	2,41	2,67	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	11,40	—
1,60	1,76	—	2,41	2,67	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	11,40	12,70
1,80	1,96	—	—	2,67	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	11,40	12,70
2,00	2,16	—	—	—	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	11,40	12,70
2,24	2,42	—	—	—	—	3,33	3,73	4,18	4,68	5,21	5,81	6,51	7,31	8,21	9,21	10,21	11,41	—
2,60	2,68	—	—	—	—	—	—	4,18	4,68	5,21	5,81	6,51	7,31	8,21	9,21	10,21	—	—
2,80	2,98	—	—	—	—	—	—	—	4,68	5,21	5,81	6,51	7,31	8,21	9,21	—	—	—
3,15	3,33	—	—	—	—	—	—	—	4,68	5,21	5,81	6,51	7,31	8,21	—	—	—	—
3,55	3,76	—	—	—	—	—	—	—	—	5,21	5,81	6,51	7,31	—	—	—	—	—

лака (провода марки ПЭВ), полиэфирного лака (провода марки ПЭТВО) и в ограниченном количестве на полиуретановом лаке (провод марки ПЭВТЛ). Основное назначение этих проводов — изготовление обмоток электронизмерительных приборов.

Для высокочувствительных приборов необходимо использовать провода, содержащие минимальное количество ферромагнитных включений, так как эти включения создают в подвижных рамках приборов дополнительный паразитный момент, который нарушает нормальную работу. Для указанных приборов могут быть рекомендованы безжелезистые провода марок ПЭЛБЖ и ПЭВБЖ (с изоляцией на масляном и поливинилацеталевом лаках), а также немагнитные провода марки ПЭВТЛ-Н с изоляцией на основе полиуретанового лака. Безжелезистые и немагнитные эмалированные провода различаются по степени магнитной загрязненности, причем к немагнитным проводам с этой точки зрения предъявляются более жесткие требования.

Эмалированные провода с двойной изоляцией, состоящей из комбинации двух лаков, совмещающей положительные свойства обоих лаков. К таким проводам относятся

провода с дополнительным термопластичным слоем марок ПЭВД и ПЭВДБ. Изоляция этих проводов состоит из пленки лака «винифлекс» и дополнительного слоя из пленки поливинилацеталевого лака или поливинилбутирала. При нагревании проводов до 120—150°С термопластичное покрытие размягчается и склеивает витки, что по существу заменяет операцию пропитки катушек. Провода с дополнительным терморезактивным слоем марки ПЭТВР имеют изоляцию, состоящую из пленки полиэфирного лака и пленки лака на эпоксидной основе. Провода марки ПЭВТЛК изолированы комбинацией полиуретанового и полиамидного лаков. Полиамидное покрытие увеличивает механическую прочность изоляции на истирание, при этом сохраняется способность провода к самооблуживанию. Одна из наиболее распространенных областей применения этих проводов — в матрицах вычислительных устройств.

Эмалированные провода из сплавов сопротивления находят применение в приборостроении, радиотехнике и других областях техники. Для эмалирования этих проводов применяется в основном лак «винифлекс» — провода марок ПЭВКТ, ПЭВКМ,

ПЭВМТ, ПЭВММ и ПЭВНХ. В качестве проводникового материала для указанных марок проводов применяются соответственно константан твердый, константан мягкий, манганин твердый и мягкий, а также никром. Провода, эмалированные полиэфирным лаком ПЭ-943, имеют маркировку ПЭТВКТ, ПЭТВКМ и ПЭТВНХ.

Эмалированные алюминиевые провода находят ограниченное применение. Эмалирование этих проводов производится в основном поливинилацетальными и полиэфирными лаками. Провода маркируются ПЭВА и ПЭТВА. Электрические и физико-механические свойства изоляции алюминиевых проводов и медных находятся примерно на одном уровне, однако нагревостойкость алюминиевых проводов несколько выше.

Прямоугольные эмалированные провода изготавливаются с сечением токопроводящих жил до 30 мм². Провода эмалируются поливинилацетальными лаками — провода марок ПЭВП и ПЭМГ, полиэфирными лаками — ПЭТВП, полиэфиримидными — ПЭТП-155 и полиимидными лаками — ПНЭТП.

Более подробный ассортимент и расчетные размеры эмалированных проводов круглого и прямоугольного сечений на примере проводов с полиэфирной изоляцией приведены в табл. 14-94 и 14-95. Номинальные диаметры проволоки в этих таблицах соответствуют новому размерному ряду, рекомендованному стандартом МЭК.

14-11. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА С ЭМАЛЕВО-ВОЛОКНИСТОЙ, БУМАЖНОЙ И ПЛЕНОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Обмоточные провода с эмалево-волоконистой изоляцией применяются для изготовления обмоток электродвигателей, генераторов, трансформаторов и других электротехнических изделий при повышенных нагрузках на провод в процессе изготовле-

ния и эксплуатации. Для обмотки проводов применяются хлопчатобумажное волокно (провод марки ПЭЛБО), волокна из натурального шелка (провод марки ПЭЛШО), а также синтетические (лавсановые и капроновые) волокна (провода марок ПЭЛЛО, ПЭВЛО, ПЭТВЛО, ПЭВТЛЛО, ПЭЛШКО и ПЭЛШКД). Хлопчатобумажное волокно обладает хорошей стойкостью к истирающим нагрузкам, однако оно достаточно гигроскопично и имеет значительную толщину. Волокна из натурального шелка имеют меньшую толщину, стойки к истирающим усилиям, однако стоимость волокон высока, поэтому все более широкое применение находит изоляция из синтетических нитей (лавсан, капрон). Слой эмали существенно улучшает электрические свойства изоляции проводов. Марки и размеры проводов с эмалево-волоконистой изоляцией приведены в табл. 14-96.

Провода с волокнистой изоляцией (табл. 14-96) имеют одинарную или двойную обмотку из хлопчатобумажного волокна (провода марок ПБД), шелкового (провод марки ПШД) или синтетического (провода марок ПЛД, ПШДК). Электроизоляционные характеристики проводов с одной волокнистой изоляцией невысоки, поскольку они определяются в основном воздушными промежутками в изоляции. Указанные провода в изделиях, как правило, подвергаются пропитке электроизоляционными лаками.

Провода с бумажной изоляцией (табл. 14-97) применяются в основном для обмоток масляных трансформаторов. Изоляция проводов марок ПБ и АПБ (алюминиевый проводник) выполняется путем обмотки кабельной бумагой толщиной не более 0,12 мм или телефонной бумагой. Для высоковольтных трансформаторов используются провода с усиленной бумажной изоляцией марок ПБУ и АПБУ. Для мощных силовых трансформаторов и реакторов выпускаются провода ПТБ и ПТБУ, которые скручиваются из эмалированных прямоугольных проволок, а снаружи обматываются не-

Таблица 14-96

Основные типы обмоточных проводов с волокнистой и эмалево-волоконистой изоляцией

Марка провода	Номинальные размеры проволоки, мм [круглая—диаметр (Ø), прямоугольная—размеры сторон (a, b)]	Удвоенная толщина изоляции, мм	Температурный индекс, °С	Действующая техническая документация
ПБД	Ø0,38—5,2	0,22—0,33	105	ГОСТ 16513-79
АПБД	Ø1,35—8,0	0,27—0,35	105	ГОСТ 16531-79
	a=1,81÷7,0 b=4,1÷18,0	0,27—0,44		
ПШД	a=0,80÷1,32 b=2,80÷4,5	0,15—0,20	105	ТУ 16.505.357-78
ПЭЛБО	Ø0,38—2,12	0,17—0,22	105	ГОСТ 16507-70
ПЭЛБД	Ø0,98—2,12	0,28—0,33	105	ТУ 16.505.357-78
ПЭЛШО	Ø0,05—1,56	0,08—0,16	105	ГОСТ 16.507-70
ПЭЛШКО	Ø0,10—1,56	0,08—0,16	105	ТУ 16.505.357-78
ПЭЛШКД	Ø0,75—1,45	0,19	105	ТУ 16.505.357-78
ПЭЛЛО, ПЭВЛО	Ø0,05—1,32	0,08—0,14	105	ГОСТ 16.507-70
ПЭТВЛО	Ø0,20—1,32	0,12—0,18	130	ТУ 16.505.357-78
ПЭВТЛЛО	Ø0,20—1,32	0,12—0,18	120	ТУ 16.505.357-78

Таблица 14-97

Основные типы обмоточных проводов с бумажной изоляцией

Марка провода	Номинальные размеры проволок, мм [круглая—диаметр ($\varnothing$), прямоугольная—размеры сторон (a, b)]	Удвоенная толщина изоляции, мм	Действующая техническая документация
ПБ	$\varnothing 1,20-5,20$	0,3—5,76	ГОСТ 16512-70
АПБ	$a=1,0 \div 5,6$	0,45—4,4	
	$b=3,0 \div 19,5$	0,3—5,76	
	$\varnothing 1,35-8,0$	0,45—4,4	
ПБУ	$a=1,81 \div 7,0$		
АПБУ	$b=4,10 \div 18,0$		
ПБУ	$a=1,81 \div 5,6$	1,35—4,4	ГОСТ 16512-70
АПБУ	$b=6,7 \div 22$		
ПТБ	$a=1,80 \div 3,55$	0,72—1,92	ТУ 16.505.367-77
ПТБУ	$b=3,75 \div 8,6$ То же	2,0—4,4	

сколькими слоями кабельной бумаги. При скрутке производится транспонирование отдельных проволок в сечении по длине провода. Применение таких проводов позволяет снизить потери в обмотках примерно на 20% за счет уменьшения потерь от вихревых токов и от уравнильных токов в параллельных ветвях.

Высокочастотные обмоточные провода (табл. 14-98) находят применение в обмотках приборов, радиоустройств и других установках, работающих при высоких частотах. Для уменьшения дополнительных потерь от поверхностного эффекта и эффекта близости жилы проводов скручиваются из отдельных эмалированных проволок. Для увеличения коэффициента заполнения сечения производится уплотнение жил, что также способствует уменьшению сопротивления провода на высоких частотах. Выпускаются провода, отдельные проволоки в которых эмалируются масляной эмалью, а общая изоляция состоит из одной или двух обмоток натуральным шелком (провода марок ЛЭШО и ЛЭШД) либо лавсановой пряжей (провода марок ЛЭЛО и ЛЭЛД). Провода марки ЛЭП скручиваются из отдельных проволок, эмалированных полиуретановым лаком. Эти провода не имеют об-

мотки пряжей. Если такие провода обматываются капроновыми нитями, то они маркируются ЛЭПКО. Токпроводящие жилы таких проводов могут содержать от 7 до 1100 изолированных проволок и работать при частотах до 100 кГц. Для обмоток повышенной нагревостойкости используются провода марок ЛЭТЛО и ЛЭНП. В последних отдельные проволоки изолированы полиэфиримидной эмалью. Эти провода предназначены для работы в системах изоляции класса нагревостойкости F (ТИ 155). Для изготовления ряда трансформаторов требуются провода повышенной гибкости. Для этих целей выпускаются провода марок ЛВОО и ЛВДО. Такие провода скручиваются из отдельных неизолированных проволок, а затем вальцуются для придания им прямоугольной формы. Изоляция провода марки ЛВОО состоит из одного слоя обмотки и слоя оплетки хлопчатобумажной пряжей, а провода ЛВДО — из двух слоев обмотки и одной оплетки хлопчатобумажной пряжей.

Обмоточные провода для погружных электродвигателей (табл. 14-99). У погружных электродвигателей, применяемых в насосах, предназначенных для перекачки нефти, а также воды из артезианских скважин и т. п., обмотка непосредственно подвергается действию перекачиваемой жидкости. Как правило, статор двигателя имеет полностью закрытые пазы, небольшой диаметр и большую длину. Обмотка таких электродвигателей изготавливается методом многократной протяжки, поэтому основные требования, которые предъявляются к обмоточным проводам, — водо- и маслостойкость, а также повышенная механическая прочность изоляции на истирание.

Для погружных электродвигателей выпускается ряд проводов с пленочной изоляцией. Это круглые провода марок ПЭТВПДЛ-3 и ПЭТВПДЛ-4 с изоляцией из слоя полиэфирной эмали и трех-четырёх слоев лавсановой пленки, подклеенной к эмалевой изоляции. Снаружи на пленочную изоляцию накладывается двухслойная обмотка из лавсановой пряжи с подклейкой и пропиткой лаком. Эти провода используются в погружных маслозаполненных электродвигателях при температурах $-60 \div +120^\circ \text{C}$.

Провода марки ППФ изолируются несколькими слоями обмотки неориентирован-

Таблица 14-98

Основные типы высокочастотных обмоточных проводов по ГОСТ 16186-74

Марка провода	Сечение, мм ²	Число и номинальный диаметр медных проволок	Температурный индекс, °C
ЛЭШО, ЛЭШД	0,0196—4,2	(10×0,05)—(1100×0,07)	105 (в пропитанном состоянии)
ЛЭЛО, ЛЭЛД	0,0196—4,2	(10×0,05)—(1100×0,07)	То же
ЛЭПКО	0,0308—1,375	(8×0,07)—(175×0,10)	120 (в пропитанном состоянии)
ЛЭТЛО	1,633—19,93	(8×0,51)—(480×0,23)	130
ЛЭНП	11,24—56,73	(51×0,53)—(301×0,49)	155

Таблица 14-99

Основные типы обмоточных проводов с пленочной изоляцией

Марка провода	Номинальные размеры проволоки, мм {круглая—диаметр ($\varnothing$), прямоугольная— размеры сторон (a , b)}	Удвоенная толщина изоляции, мм	Температур- ный индекс, °С	Действующая техни- ческая документация
ПЭТВДЛ-3 ПЭТВДЛ-4	} $\varnothing$ 1,74—2,83	0,55—0,58 0,65—0,68	120	ТУ 16.505.494-73
ППФ, ППФИ-Ф, ППФИ-К	$a=1,68 \pm 2,26$ $b=2,44 \pm 3,28$	1,04	180	ТУ 16.505.638-76
ППИ-Ф, ППИ-К	} $\varnothing$ 1,74—3,28	0,4 0,35	180	ТУ 16.505.925-76
ППИП-1 ППИП-1Ф ППИП-2 ППИП-2Ф	$a=1,18 \pm 2,8$ $b=2,12 \pm 5,6$	0,36 0,3 0,48 0,40	180	ТУ 16.705.035-78

ной пленки из фторопласта-4 и одним слоем ориентированной пленки. При 370—410°С слои пленки спекаются, что обеспечивает высокую монолитность изоляции.

Провода марок ППФИ-Ф и ППФИ-К имеют дополнительную обмотку дублированной полиимидно-фторопластовой пленкой, провода марок ППИ-Ф и ППИ-К, а также прямоугольные провода типа ППИП изолируются двумя или тремя лентами дублированной полиимидно-фторопластовой пленки. Эти провода также подвергаются термообработке для получения монолитной изоляции. Провода типов ППФ, ППФИ, ППИ и ППИП применяются в погружных электродвигателях, работающих в среде воды и пластовой жидкости (водонефте-масляной эмульсии) при $-60 \div +180^\circ\text{C}$ и давлении $1,2 \cdot 10^7$ Па (120 кгс/см²).

14-12. ПРОВОДА СО СТЕКЛОВОЛОКНИСТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Наиболее распространенными проводами со стекловолоконной изоляцией (табл. 14-100) являются медные или алюминиевые провода, изолированные двумя слоями стеклянного волокна, пропитанного глифта-левым (марки проводов ПСД и АПСД) или кремнийорганическим (провода типа ПСДК) лаками. Иногда в качестве токопроводящих жил применяются нихромовая (марки ПСДКНХ) и константановая проволока, а также проволока из других сплавов сопротивления. Эти провода используются как нагревательные и термоэлектродные. Провода с уменьшенной толщиной изоляции имеют марки ПСДТ, ПСДКТ и т. д. Для обмотки этих проводов применяется утолщенное стекловолокно. Провода с лакированной поверхностью имеют марки ПСД-Л, ПСДК-Л и т. д. Выпускаются также про-

вода с эмалево-стекловолоконной изоляцией марок ПЭТКСОТ, которые имеют более тонкую изоляцию. Эти провода, однако, обладают недостаточной механической прочностью изоляции на истирание.

Для тяговых электродвигателей, обмотки которых находятся в тяжелых эксплуатационных условиях, выпускаются провода марки ПЭТВСД с изоляцией из слоя полиэфирной или полиэфиримидной эмали и двухслойной обмоткой стекловолоконным с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком. Нагревостойкость проводов со стекловолоконной изоляцией в зависимости от пропиточного лака соответствует температурному индексу 155 (провода марок ПСД, ПСДТ, ПЭТВСД, ПЭТКСОТ) или 180 (провода марок ПСДК, ПСДКНХ, ПСДКТ).

Для увеличения нагревостойкости проводов используют биметаллические проводники (например, биметаллический проводник медь—никель). Никелевое покрытие защищает медь от окисления при высоких температурах. В результате окисления меди происходит некоторое увеличение сопротивления проводника. Кроме того, образовавшаяся на поверхности жилы пленка окиси меди значительно больше по объему, чем существовавший ранее на этом месте слой металла, поэтому рост окисной пленки приводит к растрескиванию и повреждению изоляции провода.

Провода с биметаллической жилой имеют марки ПНСД и ПНСДКТ. Ресурс этих проводов при повышенных температурах приводится в табл. 14-101.

Для эксплуатации при 500—600°С предназначены провода марки ПОЖ. В качестве проводника этих проводов используется биметаллическая проволока медь—никель; для изоляции применяется стекловолокно на кремнийорганическом замасливателе, пропитанное органосиликатными материалами. Провода марки ПОЖ пред-

Таблица 14-100

Основные типы обмоточных проводов со стекловолокнистой изоляцией

Марка провода	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм [круглая—диаметр ($\varnothing$), прямоугольная—размеры сторон (a, b)]	Удвоенная толщина изоляции, мм	Температурный индекс, °C	Действующая техническая документация
ПСД, ПСД-Л	$\varnothing 0,31-5,2$ $a=0,9 \div 5,6$ $b=2,1 \div 12,5$	$0,23-0,35$ $0,32-0,50$ $0,27-0,42$	155	ГОСТ 7019-71
ПСДК, ПСДК-Л	$\varnothing 0,31-5,2$ $a=0,9 \div 5,6$ $b=2,1 \div 12,6$	$0,23-0,35$ $0,32-0,50$ $0,27-0,42$		
ПСДТ, ПСДТ-Л	$\varnothing 0,31-2,1$	$0,18-0,25$		
ПСДКТ, ПСДКТ-Л	$\varnothing 0,31-2,10$ $a=0,9 \div 3,55$ $b=2,10 \div 10,0$	$0,14-0,24$ $0,26-0,34$ $0,22-0,24$	180	» »
ПЭТКСОТ	$\varnothing 1,33-1,56$ $a=0,83 \div 1,45$ $b=2,1 \div 4,7$	$0,14-0,16$ $0,20-0,22$ $0,18-0,22$		
ПЭТВСД	$\varnothing 1,16-2,44$ $a=1,01 \div 3,53$ $b=2,83 \div 8,0$	$0,35$ $0,51-0,61$		
АПСД	$\varnothing 1,60-3,05$ $a=1,8 \div 5,6$ $b=3,35 \div 14,0$	$0,27-0,33$ $0,39-0,50$ $0,27-0,40$	155	ТУ 16.505.408-78
ПСДКНХ	$\varnothing 0,50-0,60$	$0,21-0,22$		
ПНСДКТ	$\varnothing 0,315-2,12$	$0,14-0,22$		
ПОЖ	$\varnothing 0,315-3,00$ $a=0,9 \div 3,55$ $b=2,12 \div 10,6$	$0,28-0,36$ $0,44-0,62$ $0,35-0,43$	300	ТУ 16.505.490-73 ТУ 16.505.472-73 ТУ 16.505.399-77

Таблица 14-101

Ресурс нагревостойких проводов со стекловолокнистой изоляцией, ч

Марка провода	Температура, °C			
	250	300	350	400
ПНСДК	15 000—20 000	3000	2000	500
ПНСДКТ	15 000—20 000	3000	2000	200
ПСДК	5000—7000	750	500	120
ПСДКТ	4000—5000	300	200	50

назначены для эксплуатации при 300° C в течение 12 000 ч, при 500° C в течение 500 ч и при 600° C в течение 150 ч.

14-13. ПРОЧИЕ ТИПЫ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

Микропровода в сплошной стеклянной изоляции получают путем вытягивания тонкой металлической илти из разогретого прутка металла, находящегося в стеклянной трубке. Выпускаются провода марки ПССМ с маганиновой жилой. Диаметр проводов — от 3 до 100 мкм. Такие провода используются для изготовления резисторов. Медные провода марки ПМС выпускаются диаметром от 5 до 200 мкм с толщиной изоляции от 1 до 35 мкм. Пробивное напряжение изоляции этих проводов очень высокое (может достигать 2000 В) за счет того, что поверхность проводника исключи-

тельно гладкая, почти полированная. У этих проводов практически отсутствуют точечные повреждения изоляции. Однако существенным недостатком проводов является хрупкость стеклянной изоляции. Допустимый радиус изгиба в холодном состоянии равен 100 диаметрам провода, поэтому намотка изделий должна осуществляться при подогреве провода до температуры, при которой стекло становится пластичным.

Обмоточные провода с дельта-асбестовой изоляцией марки ПДА выпускаются круглого и прямоугольного сечения, в основном больших размеров [диаметр проводов — от 1,81 до 4,8 мм, размер прямоугольных проводов — $(1,16-5,1) \times (4,1-7,4)$ мм].

Дельта-асбестовая изоляция состоит из асбестовых волокон, пропитанных и подклеенных к проводу с помощью глифталевого лака. Эти провода обладают хорошей нагревостойкостью (ТИ 155). Изоляция проводов имеет высокую механическую прочность, что позволяет использовать провода в тяжелых условиях изготовления обмоток электрических машин при применении ударных нагрузок на провод. К недостаткам дельта-асбестовой изоляции следует отнести сравнительно большую ее толщину (0,15—0,20 мм) и невысокую электрическую прочность — пробивное напряжение изоляции составляет около 400 В.

Сверхпроводящие и криопроводящие

Таблица 14-102

Характеристики одножильных сверхпроводящих обмоточных проводов

Материал	Критические токи при 2 Тл, А	Наружный диаметр провода, мм	Диаметр проволоки по сверхпроводнику, мм	Толщина изоляции, мм	Стабилизирующая оболочка
Сплав НЦ-50	200	0,32	0,25	0,02	Латунь
Сплав НТ-50	140	0,32	0,25	0,02	Медь

Таблица 14-103

Характеристики многожильных сверхпроводящих обмоточных проводов

Количество элементарных проволок в проводе и способ скрутки	Критический ток, А, при 6 Тл для сплавов		
	Т-60, диаметр провода 0,3 мм	НТ-50, диаметр проволоки	
		0,5 мм	1,0 мм
<i>К р у г л ы е</i>			
7	170	560	2240
49 (7×7)	1175	3900	15 670
133 (7×19)	3530	11 750	47 000
19	560	1675	6700
133 (19×7)	3025	10 070	40 235
361 (19×19)	9075	30 200	120 850
<i>П л о с к и е</i>			
6	170	560	2240
9	250	840	3350
11	300	1025	4100
12	340	1120	4475
13	365	1210	4850

Таблица 14-104

Основные типы и конструкции криопроводниковых обмоточных проводов

Марка провода	Наименование	Конструкция жилы		Диаметральная толщина изоляции, мм		Диаметр готового провода, мм
		Число элементарных проволок	Диаметр элементарных проволок, мм	Элементарных проволок	Провода	
ПАЛКО	Провод криопроводниковый обмоточный с алюминиевой жилой, изолированной лавсановым волокном	1	0,8—2,0	0,16—0,20	—	0,96—2,20
ПАЭКО-имид	Провод криопроводниковый обмоточный с алюминиевой жилой, изолированный полиимидным лаком ПАК-1	1	0,3—2,0	0,035—0,07	—	0,335—2,07
ПАЭЛКО	Провод многожильный с алюминиевыми проволоками, эмалированными полиимидным лаком, в общей лавсановой обмотке	25 300	0,3 0,3	0,015 0,015	0,20 0,20	2,0 8,34
ПАОП	Провод с жилой из алюминиевой фольги, изолированной лавсановой пленкой, дублированной полиэтиленом	1	Фольга 0,05×100	0,07	—	0,12×100

вые обмоточные провода. Сверхпроводящие обмоточные провода нашли применение в обмотках мощных электромагнитов, в соленоидах, предназначенных для физических исследований. Криопроводниковые обмоточные провода используются в криогенераторах и криотрансформаторах.

Сверхпроводящие обмоточные провода выпускаются в одножильном и многожильном исполнении.

Одножильные провода представляют собой жилу из легко деформируемых сверхпроводящих сплавов (ниобий — титан, ниобий — цирконий, ниобий — цирконий — титан), заключенную в оболочку из стабилизирующего металла (меди) и изолированную эмалировочными лаками.

Характеристики некоторых одножильных сверхпроводящих проводов приводятся в табл. 14-102.

В поле с индукцией 6 Тл критические токи обоих проводов равны и составляют примерно 50 А.

Многопроволочные провода скручиваются из круглых стабилизирующих сверхпроводящих проволок. Межпроволочное пространство заполняется стабилизирующим металлом (индием). В некоторых конструкциях проводов для дополнительной стабилизации используется медная проволока диаметром, равным диаметру сверхпроводящей проволоки. В качестве изоляции для многопроволочных проводов применяется обмотка или оплетка синтетическими воло-

Таблица 14-105

Цены трехжильных силовых кабелей, руб/км

Марка кабеля	Сечение жил, мм²											
	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
СГ (1 кВ)	625	820	1095	1400	1740	2260	2940	3820	4650	5640	6760	8600
СГ (10 кВ)	—	—	2000	2320	2720	3300	4060	4970	6050	7070	8300	10 200
АСГ (1 кВ)	530	630	810	950	1095	1360	1685	2090	2500	2950	3450	4250
АСГ (10 кВ)	—	—	1675	1885	2110	2450	2810	3269	3700	4360	4840	5600
АСБ (1 кВ)	660	785	950	1035	1190	1425	1740	2160	2620	3090	3650	4530
СК (10 кВ)	—	—	3110	3480	3960	4660	5500	6600	7800	8900	10 200	12 000
АСК (10 кВ)	—	—	2750	2970	3340	3700	4200	4770	5400	6200	6700	7500
ЦАСБ (10 кВ)	—	—	—	2290	2580	2840	3200	3600	3990	4770	5700	—
ОСБ (20 кВ)	—	—	—	6200	6600	7400	8000	8700	9200	9700	10 300	—
ОСБ (35 кВ)	—	—	—	—	—	—	10 500	10 800	11 100	11 500	—	—
АОБ (20 кВ)	—	—	—	5200	5700	6500	7400	8500	9300	10 300	11 500	—
ААГ (1 кВ)	250	310	365	435	505	640	825	1055	1315	1630	1925	2390
ААБл (1 кВ)	600	700	785	855	960	1140	1370	1650	1965	2330	2690	3250
ААШв (1 кВ)	365	465	585	675	770	920	1105	1410	1680	2090	2430	2940
ААГ (10 кВ)	—	—	750	830	920	1070	1270	1530	1810	2170	2520	3050
ААБл (10 кВ)	—	—	—	1794	1950	2180	2510	2910	3310	3840	4350	5150
ААШв (10 кВ)	—	—	1055	1140	1250	1440	1655	1990	2310	2740	3150	3830
ВВГ (6 кВ)	—	1380	1650	2070	2500	3030	3700	4600	5570	6550	7700	9500
АВВГ (6 кВ)	—	1100	1200	1365	1530	1800	2150	2600	2900	3260	3690	4370
ПВГ (6 кВ)	—	1155	1400	1770	2150	2680	3350	4200	5050	6000	7200	9200
АПВГ (6 кВ)	—	930	1000	1135	1275	1480	1760	2100	2390	2740	3150	3750
ВВБ (6 кВ)	—	1495	1775	2130	2550	3140	3860	4780	5780	6730	7900	9800
АПАШв (6 кВ)	—	1000	1170	1250	1450	1700	2050	2490	2900	3350	3900	4100
ЦАСБ (6 кВ)	—	—	—	1780	2000	2310	2640	3060	3480	4100	4830	—

нами либо обмотка пленками. Некоторые параметры скрученных индированных проводов приведены в табл. 14-103.

Основные типы и конструкции криопробниковых обмоточных проводов приведены в табл. 14-104. Исходным материалом для токопроводящих жил служат слитки алюминия А999. Существующая технология волочения тонких проволок из слитков позволяет обеспечить увеличение проводимости алюминия при криогенных температурах в 1000—1500 раз.

14-14. ЦЕНЫ НА КАБЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Цены на кабельные изделия определяются Прейскурантом 15-05 (Прейскурантиздат, М.: 1971.—207 с.). Приведенные в этом прейскуранте цены действуют с 1973 г. До 1978 г. издано 80 дополнений к прейскуранту, в каждое из которых входят цены на ряд разнообразных кабельных изделий

(либо цены на новые изделия, либо измененные цены на ранее выпускавшиеся изделия). Цены на все кабельные изделия изложить в настоящем справочнике не представляется возможным. Поэтому в табл. 14-105—14-113 приведены цены для характерных представителей различных кабельных изделий, по которым можно также составить представление о ценах марок кабелей и проводов близких к ним конструкций.

Приведенные цены не следует использовать как финансовый документ, так как цены в прейскуранте несколько изменяются с течением времени.

Для вычисления длины эмалированного провода (м) массой 1 кг можно использовать формулу

$$l = 1 / [\pi d (\rho_m d/4 + \rho_a \Delta)],$$

где d — диаметр провода, м; Δ — толщина эмали, м; ρ_m — плотность металла жилы, кг/м³; ρ_a — плотность эмали (примерно 1400 кг/м³).

Таблица 14-106

Цены трехжильных кабелей СРГ и АВРГ на напряжение 660 В, руб/км

Марка кабеля	Сечение жил, мм ²															
	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
СРГ	440	460	530	630	690	870	1150	1580	2020	2660	3520	4600	5600	6800	8200	—
АВРГ	—	—	345	380	430	535	690	920	1180	1450	1825	2290	2915	3660	4540	5915

Таблица 14-107

Стоимость основного оборудования и материалов для сооружения кабельных линий 110—220 кВ

Наименование	Цена, руб/км	Наименование	Цена, руб/км
Одна фаза маслонаполненного кабеля 110 кВ среднего давления сечением 270 мм ² :		Концевая муфта для одной фазы кабеля в стальном трубопроводе с маслом под давлением:	
марка МНСА	17 500	110 кВ	1100
марка МНСК-4*	19 600	220 кВ	2500
марка МНСК-6*	22 700	Соединительная муфта для одной фазы маслонаполненного кабеля:	
Одна фаза маслонаполненного кабеля 110 кВ среднего давления марки МНСК-4:		110 кВ	675
сечением 150 мм ²	15 000	220 кВ	1140
сечением 550 мм ²	24 600	Стопорная муфта для одной фазы маслонаполненного кабеля:	
Одна фаза маслонаполненного кабеля 220 кВ среднего давления сечением 500 мм ² :		110 кВ	2500
марка МНСА	32 400	220 кВ	6650
марка МНСК-6	38 700	Соединительная муфта на три фазы кабельной линии в стальном трубопроводе:	
Одна фаза маслонаполненного кабеля 220 кВ среднего давления марки МНСА с 16 стальными проволоками в защитном покрове:		на линии 110 кВ	722
сечением 350 мм ²	25 240	на линии 220 кВ	1200
сечением 625 мм ²	37 000	Разветвительная муфта на три фазы кабеля в стальном трубопроводе:	
Одна фаза кабеля марки 110 кВ для затягивания в стальной трубопровод:		110 кВ	710
сечением 270 мм ²	14 000	220 кВ	870
сечением 425 мм ²	16 370	Бак давления для подпитки маслонаполненных кабелей:	
сечением 550 мм ²	27 680	типа БД-5-0,25	1390
Одна фаза кабеля сечением 550 мм ² марки МВДТ 220 кВ для затягивания в стальной трубопровод		типа БД-5-0,5	1390
Концевая муфта для одной фазы маслонаполненного кабеля среднего давления:		Масло марки МН-4 для маслонаполненных кабелей	145
110 кВ	1000	Масло марки С-220 для заполнения трубопроводов кабельных линий высокого давления	960
220 кВ	3750	Насосный агрегат для автоматической подпитки кабельной линии в отдельном трубопроводе	1200
		Кабельный ввод в трансформатор для маслонаполненного кабеля высокого давления на 220 кВ	3570

* Цифра 4 (6) через черточку в обозначении марки кабеля показывает, что бронепровод выполнен из стальных проволок диаметром 4 (6) мм.

Таблица 14-108

Цены установочных проводов, руб/км

Марка провода	Сечение жилы, мм ²										
	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	4	6	10	16	25	50
ПВ	14,5	17,5	20,5	24,5	36	49	69	116	—	—	—
АПВ	—	—	—	—	23,5	29,5	36	56	—	—	—
АПВ (2 жилы)	—	—	—	—	47	58	73	—	—	—	—
АПВ (3 жилы)	—	—	—	—	70	80	108	—	—	—	—
ППВ (2 жилы)	—	35	40	52	79	98	—	—	—	—	—
ППВ (3 жилы)	—	52	60	75	114	161	—	—	—	—	—
АПР	—	—	—	—	23,5	29,5	36	56	78	114	215
АПРТО (2 жилы)	—	—	—	—	95	110	135	195	280	410	760
АПРТО (3 жилы)	—	—	—	—	120	160	210	330	500	750	1425
ПР	—	17,5	20,5	24,5	36	49	69	116	190	295	566

Таблица 14-109

Цены контрольных кабелей и кабелей управления, руб/км

Марка кабеля		Сечение жил, мм ²											
		0,35	0,35	1,0	1,0	1,5	1,5	2,5	2,5	4	4	6	6
КСРГ	Число жил Цена	— —	— —	4 375	37 1630	4 414	37 1950	4 485	37 2570	4 585	10 1150	4 720	10 1430
КСРК	Число жил Цена	— —	— —	10 1970	37 3440	10 2120	37 3900	7 1940	37 4700	7 2150	10 2670	7 2440	10 3060
КНРГ	Число жил Цена	— —	— —	4 150	52 1380	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
КВВГ	Число жил Цена	— —	— —	4 130	61 1370	— —	— —	4 210	37 1545	— —	— —	— —	— —
АКВВГ	Число жил Цена	— —	— —	— —	— —	— —	— —	4 150	37 850	— —	— —	— —	— —
КУПР	Число жил Цена	4 165	108 1220	4 260	37 970	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —

Таблица 14-110

Цены монтажных проводов, руб/км

Марка кабеля		Сечение жил, мм ²									
		0,08	0,10	0,12	0,14	0,20	0,35	0,5	0,75	1,0	1,5
МШВ		5,9	—	—	—	7,5	9,8	12	15,4	18,9	25,5
МГШВ (1 жила)		—	—	6,4	7,2	8,9	13,3	15,4	19,6	23,8	32,2
МГШВЭ (2 жилы)		—	—	—	—	—	92	101	112	—	—
МГШВЭ (3 жилы)		—	—	—	—	—	100	124	140	—	—
МПСПО (1 жила)		—	—	15,7	16,0	16,6	18,5	22,5	—	—	—
МПСПО (3 жилы)		—	—	—	—	—	81	95	—	—	—
ГФ		60	—	76	105	200	240	300	360	430	—
ППВ, ПМОВ		—	—	—	—	4,3	6,3	8,4	11,8	17,0	—
МПКШ (2 жилы)		—	—	—	—	—	68	—	—	—	—
МПКШ (14 жил)		—	—	—	—	—	—	—	310	—	—
КМВВ (2 жилы)		—	—	—	—	—	—	—	84	—	—
КМВВ (10 жил)		—	—	—	—	—	—	215	—	—	—
КМПЭВ (4 жилы)		240	—	—	—	—	260	—	—	—	—
КМПЭВ (52 жилы)		2400	—	—	—	—	2720	—	—	—	—

Таблица 14-111

Цены обмоточных проводов, руб. за 1000 кг

Марка провода	Диаметр провода, мм							
	0,02	0,04	0,08	0,16	0,33	0,64	1,30	2,44
ПЭЛ	3·10 ⁵	2,3·10 ⁴	3000	1700	1350	1230	1090	1015
ПЭВ-1, ПЭМ-1	3,1·10 ⁵	4,9·10 ⁴	6220	3300	1690	1360	1125	1045
ПЭВ-2, ПЭМ-2	—	—	6400	3370	1730	1330	1145	1070
ПЭВА	—	—	2,54·10 ⁴	1,02·10 ⁴	3100	1970	1360	1170
ПЭЛР	—	—	—	3250	1670	1350	1120	1045
ПЭТВ	—	—	8200	3590	1900	1450	1215	1140
ПЭТВА	—	—	—	11 200	3400	2130	1470	1250
ПЭВТЛ-2	—	—	9100	4370	2180	1630	1420	—
ПЭВ-Д	—	—	—	3690	1940	1480	—	—
ПЭМФ	—	—	—	—	1950	1540	—	—

Продолжение табл. 14-111

Марка провода	Диаметр провода, мм							
	0,02	0,04	0,08	0,16	0,33	0,64	1,30	2,44
ПЭВКТ-2	3,4·10 ⁵	5,92·10 ⁴	1,09·10 ⁴	6600	4500	3300	—	—
ПЭВМТ-2	3,42·10 ⁵	5,97·10 ⁴	1,1·10 ⁴	6700	4550	3350	—	—
ПЭВНХ-2	8·10 ⁵	15·10 ⁴	4,9·10 ⁴	2,04·10 ⁴	—	—	—	—
ПЭФ-155	—	—	—	—	2240	1780	—	—
ПНЭТ-имид	—	—	1,1·10 ⁵	4·10 ⁴	1,74·10 ⁴	1,08·10 ⁴	8350	5200
ПЭЛШО	—	—	4,8·10 ⁴	2·10 ⁴	1,1·10 ⁴	5850	3300	—
ПЭЛШКО	—	—	1,4·10 ⁴	6300	2400	1640	1360	—
ПЭЛЛО	—	—	1,4·10 ⁴	6300	2400	1640	1210	—
ПЭВЛО	—	—	1,47·10 ⁴	7000	2500	1820	1230	—
ПЭТВСД	—	—	—	—	—	—	2300	1960
ПВ	—	—	—	—	—	—	1065	970
ПЛБД	—	—	—	—	—	—	1215	1090
ПСД	—	—	—	—	2500	2320	1470	1225
ПСДК	—	—	—	—	6220	2720	1820	1440

Таблица 14-112

Цены прямоугольных обмоточных проводов, руб. за 1000 кг

ПЭВП	Сеченье, мм ² Цена	До 3 1450	3,1—5 1220	5,1—9 1160	9,1—13 1150	—	—	—	—
ПЭТВП	Сечение, мм ² Цена	До 3 1610	3,1—5 1320	5,1—9 1290	9,1—13 1250	13,1—17 1230	17,1—21 1200	21,1—25 1180	—
ПСД	Сечение, мм ² Цена	До 2,8 1630	2,81—5 1410	5,1—10 1300	10,1—15 1215	15,1—20 1180	20,1—30 1170	30,1—40 1140	40,1—80 1120
ПСДК	Сечение, мм ² Цена	До 2,8 2090	2,81—5 1690	5,1—10 1500	10,1—15 1370	15,1—20 1330	20,1—30 1290	30,1—40 1250	40,1—80 1225
ПСОТ	Сечение, мм ² Цена	До 2,8 1860	2,81—5 1620	5,1—8 1590	— —	— —	— —	— —	—
ППЛВО	Сечение, мм ² Цена	До 2,8 2130	2,81—5 1620	5,1—10 1480	10,1—15 1340	15,1—20 1290	20,1—30 1250	— —	—

Таблица 14-113

Цены немагнитных эмалированных проводов марки ВЭБЖН, руб. за 1000 кг

Диаметр по металлу, мм	0,03	0,04	0,06	0,07
Цена	540 000	300 000	58 000	25 000

Список литературы

- 14-1. Основы кабельной техники/В. А. Привезенцев, И. И. Гроднев, С. Д. Холодный, И. Б. Рязанов—М.: Энергия, 1975.—472 с.
- 14-2. Привезенцев В. А., Ларина Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии.—М.: Энергия, 1970.—424 с.
- 14-3. Привезенцев В. А., Пешков И. Б. Обмоточные и монтажные провода.—М.: Энергия, 1971.—552 с.
- 14-4. Белоруссов Н. И., Саакян А. Е. Яковлева А. И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник.—М.: Энергия, 1979.—416 с.
- 14-5. Гроднев И. И. Кабели связи.—М.: Энергия, 1976.—270 с.

14-6. Финкель Э. Э., Брагинский Р. П. Нагревостойкие провода и кабели с радиационно-модифицированной изоляцией.—М.: Энергия, 1975.—193 с.

14-7. Монтажные провода для радиоэлектронной аппаратуры/А. Л. Гольдберг, В. П. Иноземцев, Л. И. Крайхфельд и др.—М.: Энергия, 1973.—296 с.

14-8. Свалов Г. Г., Белый Д. И. Сверхпроводящие и кнорезистивные обмоточные провода.—М.: Энергия, 1976.—168 с.

14-9. Правила устройства электроустановок.—М.: Энергия, 1966.—464 с.

14-10. Крайхфельд Л. И., Веселовский С. Б., Фролов В. Г. Кабели управления и контрольные.—М.: Энергия, 1975.—192 с.

14-11. Кабыстина Г. Ф. Обмоточные провода со стекловолоконной изоляцией и технология их производства.—М.: Энергия, 1976.—176 с.

14-12. Пешков И. Б. Эмалированные провода.—М.: Энергия, 1975.—166 с.

14-13. Гнесин А. М., Пирогов Е. В. Инструкция по монтажу электрооборудования, силовых и осветительных сетей взрывоопасных зон.—М.: Энергия, 1976.—144 с.

14-14. Бранзбург Е. З., Сохранский С. Т. Монтаж муфт на кабелях с бумажной и пластмассовой изоляцией напряжением до 35 кВ.—М.: Энергия, 1971.—270 с.

14-15. Шварцман Л. Г. Муфты силовых кабелей высокого напряжения. — М.: Энергия, 1977. — 175 с.

14-16. СТ СЭВ 585-77. Кабельные изделия. Термины и определения.

14-17. Кабели, провода, шнуры электрические

и вспомогательные материалы. Часть 1. Сборник стандартов. — М.: Изд-во стандартов. — М.: 1975. — 567 с.

14-18. Кабели, провода, шнуры электрические. Сборник стандартов. Часть 2. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 490 с.

Раздел 15

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И МИКРОСХЕМЫ

СОДЕРЖАНИЕ

15-1. Полупроводниковые диоды . . .	481
15-2. Транзисторы . . .	483
Биполярные транзисторы (483). Полевые транзисторы (485). Эквивалентные схемы биполярных транзисторов (487). Эквивалентные схемы полевых транзисторов (490).	
15-3. Тиристоры . . .	491
15-4. Оптоэлектронные приборы . . .	494
Вентильные фотоэлементы и фотодиоды (494). Фототранзисторы (494). Оптоны (495)	
15-5. Интегральные микросхемы . . .	495
15-6. Операционные усилители и их применение . . .	497
Основные параметры ОУ (497). Обратные связи в ОУ (498). Суммирование напряжений (499). Интегрирование напряжений (499). Стабилизация напряжений (499). Активные фильтры (499). Ограничитель напря-	

жения (500). Компаратор (500). Генераторы прямоугольного напряжения (500). Преобразователи напряжения в частоту и длительность импульса (501)	
15-7. Логические интегральные микросхемы и их применение . . .	501
Основные понятия о логических функциях (501). Соотношения алгебры логики (502). Минимизация логических выражений (503). Примеры описания и минимизации логических выражений (503). Аппаратурная реализация логических зависимостей (505). Дешифраторы (506). Триггеры и триггерные устройства (506). Счетчики (508). Регистры (508). Распределители (509). Синтез схем с памятью (509). Интегральные микросхемы с большой степенью интеграции и микропроцессоры (510).	
Список литературы . . .	511

15-1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Основой большинства полупроводниковых приборов является электронно-дырочный ($p-n$) переход, возникающий на кон-

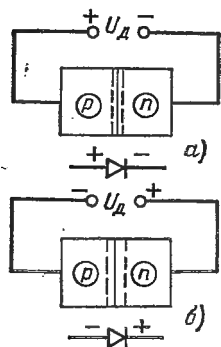


Рис. 15-1. Прямое (а) и обратное (б) смещение $p-n$ перехода.

центраций основных носителей обычно справедливо соотношение $p_p \gg n_n$ (см. § 3-1), поэтому область с большей концентрацией основных носителей является доминирую-

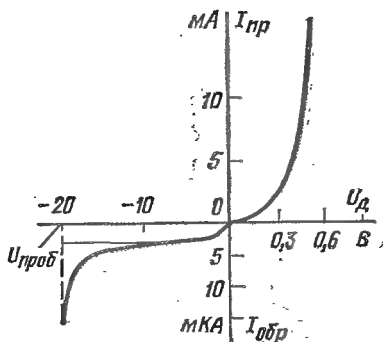


Рис. 15-2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода.

такте двух полупроводников с различными типами электропроводности (см. § 3-1).

В полупроводниковых приборах обычно применяются несимметричные $p-n$ переходы. В несимметричных переходах для кон-

щим источником подвижных носителей и получила название эмиттера, а более высокоомная область называется базой.

Таблица 15-1

Силовые выпрямительные диоды

Тип	I_{FSM}^* , кА	I_{RRM}^* , мА	M^* , кг	R_{thj-c} , °C/Вт
Д112-10, ДЛ112-10	0,21	1	0,006	3,0
Д112-16, ДЛ112-16	0,25	1,5	0,006	2,5
Д112-25, ДЛ112-25	0,3; 0,27	2-4	0,006	2,0
Д122-32, ДЛ122-32	0,4	4-6	0,012	1,3
Д122-40, ДЛ122-40	0,5	4-6	0,012	1,0
Д132-50, ДЛ132-50	1	4-8	0,027	0,8
Д132-63, ДЛ132-63	1,1	6-8	0,027	0,72
Д132-80, ДЛ132-80, ДЧ151-80	1,2 (2,4)	8-10 (25)	0,027 (0,18)	0,5 (0,27)
Д151-100, ДЧ151-100	1,9 (2,7)	20 (25)	0,18	0,3 (0,27)
Д151-125, ДЧ151-125	2,2 (4,5)	20 (35)	0,18 (0,29)	0,3 (0,18)
Д151-160, ДЧ151-160	3 (5)	20 (35)	0,18 (0,29)	0,3 (0,18)
Д161-200, ДЛ161-200	5,5	40; 25	0,29	0,15
Д161-250, ДЧ171-250	6,4 (8)	40 (60)	0,29 (0,51)	0,15 (0,08)
Д161-320	7,5	50	0,29	0,15
ДЛ123-320	5,5	25	0,08	0,08
ДЛ171-320, ДЧ171-320	7,5 (9)	25 (60)	0,56 (0,51)	0,09 (0,08)
Д171-400	10,5	50	0,51	0,09
Д133-400	7	50	0,21	0,045
Д133-800	12	50	0,21	0,045
Д143-800	15	50	0,29	0,034
Д253-1600	28	100	0,61	0,024

* I_{FSM} — ударный неповторяющийся прямой ток; I_{RRM} — повторяющийся импульсный обратный ток; M — масса; R_{thj-c} — тепловое сопротивление переход — корпус.

Примечания: 1. ДЛ — лавинные диоды; ДЧ — быстросовосстанавливающиеся диоды (в случае расхождения данные для них приведены в скобках).

2. Средний прямой ток диода I_{FAV} , А, содержится в марке прибора. Температура корпуса $T_{\text{к}} = 100 \div 150^\circ \text{C}$ для серии Д, $100-120^\circ \text{C}$ для ДЛ и 100°C для ДЧ. Температура перехода $T_j = 150 \div 190^\circ \text{C}$ для серии Д, $140-160^\circ \text{C}$ для ДЛ и 140°C для ДЧ. Импульсное прямое напряжение 1,35 В при токе 3,14 А для ДЛ112-10, 2,1-1,5 В для ДЛ133-400-Д253-1600, 1,45 В для ДЛ161-200 и ДЛ171-320, 1,45-2,1 В для ДЧ. Повторяющееся импульсное обратное напряжение $U_{RRM} = 100 \div 1400$ В для ДЛ112-10-Д132-80, 300-1600 В для ДЛ151, Д161 и Д171, 1000-4000 В для ДЛ133-400 1800-2800 В для ДЛ143-800, 400-1600 для ДЛ133-800, 400-2000 В для ДЛ253-1600, 400-1500 для ДЛ112-10-ДЛ132-80, 400-1400 для ДЛ161-300 и ДЛ171-320, 800-1200 В для серии ДЧ. Для диодов импульсное рабочее обратное напряжение $U_{RRM} = 0,8 U_{RRM}$, напряжение пробоя для лавинных приборов $U_{BR} = 1,25 U_{RRM}$, неповторяющееся импульсное обратное напряжение $U_{RSM} = 1,15 U_{RRM}$, допустимая рабочая частота 1500-2000 Гц, время обратного восстановления $t_{rr} = 1,6 \div 3,2$ мкс (для ДЧ).

3. Диоды ДЛ123, Д133, Д143 и Д253 имеют таблеточную конструкцию.

Электронно-дырочный переход является основным элементом полупроводникового диода. Такой переход обладает ярко выраженными вентильными свойствами. Так, если к $p-n$ переходу приложить внешнее напряжение в прямом направлении (рис. 15-1, а), то это приведет к снижению потенциального барьера на границе двух областей и вызовет дополнительную инжекцию основных носителей из области p в область n , что соответствует увеличению тока во внешней цепи. И наоборот, если $p-n$ переход будет смещен в обратном направлении, как показано на рис. 15-1, б, то это приведет к увеличению потенциального барьера и практически полному прекращению диффузии основных носителей через переход, что соответствует уменьшению до минимума тока во внешней цепи. График типичной вольт-амперной характеристики $p-n$ перехода показан на рис. 15-2. Ток $p-n$ перехода зависит от приложенного внешнего напряжения и его полярности и описывается зависимостью

$$I = I_0 (e^{U_{\text{п}}/\varphi_{\text{T}}} - 1),$$

где $U_{\text{п}}$ — напряжение на собственно $p-n$ переходе; φ_{T} — температурный потенциал,

равный $0,026$ В при 20°C ; I_0 — тепловой ток, который определяется концентрацией неосновных носителей в полупроводнике (ток насыщения).

При обратном включении диода ток определяется по формуле

$$I_{\text{обр}} = I_s + \frac{U_{\text{д}}}{r_{\text{ут}}},$$

где $r_{\text{ут}}$ — сопротивление утечки, обусловливающее наклон обратной ветви вольт-амперной характеристики диода.

При быстром изменении напряжения, приложенного к диоду, последний проявляет реактивные свойства, вызывая искажение формы переключаемых импульсов либо частотные и фазовые искажения в случае синусоидального сигнала. Реактивные свойства диода учитываются в эквивалентной схеме замещения с помощью суммарной эквивалентной емкости $C_{\text{д}}$, численные значения которой обычно приводятся в справочных данных.

Качество работы диода в электронных цепях характеризуется электрическими параметрами, приводимыми в справочнике для номинальных и предельных режимов рабо-

ты. Такими параметрами являются прямой допустимый ток диода $I_{пр}$, выпрямленный ток $I_{ср}$ (среднее за период значение тока), обратный ток $I_{обр}$, прямое падение напряжения при установленном выпрямленном токе $U_{пр}$, обратное напряжение $U_{обр}$, наибольшая допустимая мощность P , диапазон рабочих частот Δf и ряд других¹.

Вольт-амперная характеристика и параметры диода сильно зависят от температуры окружающей среды. Наиболее значительно меняется с температурой обратный ток диода (приблизительно удваивается на каждые 10°C).

Допустимый диапазон рабочих температур для германиевых диодов составляет $-60 \div +70$, для кремниевых $-60 \div +150^\circ \text{C}$. С увеличением температуры уменьшается допустимая мощность, рассеиваемая диодом.

При увеличении обратного напряжения на $p-n$ переходе сверх допустимого предела возникает пробой перехода, что выражается в резком увеличении обратного тока перехода (см. рис. 15-2). В зависимости от внешних условий пробой может быть обратимым и необратимым. Последний ведет к разрушению прибора.

Явление обратимого пробоя используется в лавинных диодах и в полупроводниковых стабилитронах — кремниевых диодах, напряжение в которых в области обратного пробоя слабо зависит от тока. При ограничении тока состояние пробоя в стабилитроне может поддерживаться и воспроизводиться в течение десятков тысяч часов. Промышленно выпускается большое количество типов кремниевых стабилитронов на различные рабочие напряжения и токи.

В табл. 15-1 приведены справочные данные по силовым выпрямительным диодам. Названия и обозначения параметров соответствуют [15-10].

15-2. ТРАНЗИСТОРЫ

Транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, которые применяются для усиления электрических сигналов. В зависимости от принципа действия транзисторы подразделяются на биполярные и полевые (униполярные).

Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор представляет собой трехэлектродный прибор, имеющий два взаимодействующих $p-n$ перехода и имеющий трехслойную структуру $p-n-p$ (или $n-p-n$) (рис. 15-3). Средняя область называется базой, а крайние — эмиттером и коллектором.

¹ Приведенные параметры и их буквенные обозначения относятся к диодам, выпускаемым электронной промышленностью. Для силовых диодов утверждены иные названия и обозначения параметров, приведенные частично в табл. 15-1.

Разрезы конструкций сплавного и планарного транзисторов показаны на рис. 15-4, а и б.

В транзисторе с равномерным распределением атомов примеси в слоях полупроводников распределение равновесных концентраций основных и неосновных носителей имеет вид, показанный пунктиром на рис. 15-3.

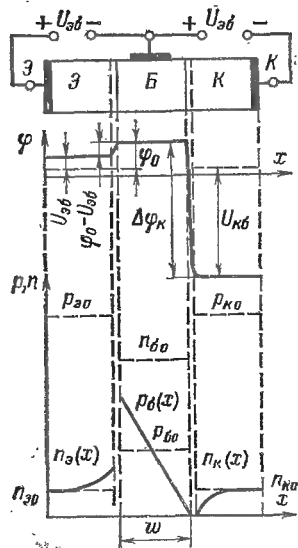


Рис. 15-3. Структура биполярного транзистора (типа $p-n-p$) и распределение потенциала φ и концентраций основных и неосновных носителей в слоях полупроводников в равновесном и неравновесном состояниях.

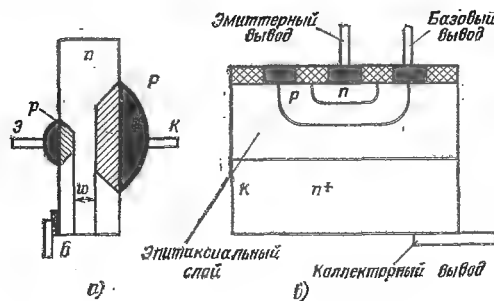


Рис. 15-4. Разрез конструкций сплавного (а) и планарного (б) транзисторов.

Если к выводам транзистора приложить внешние напряжения таким образом, что эмиттерный переход смещается в прямом направлении, а коллекторный — в обратном, то такое включение называют нормальным, т. е. соответствующим усилительному режиму работы. Применительно к структуре $p-n-p$ этому смещению переходов соответствуют напряжения $U_{эб} > 0$ и $U_{бк} < 0$ (рис. 15-3).

При наличии приложенных напряжений распределение концентраций носителей и

электростатического потенциала в слоях показано сплошными линиями на рис. 15-3. Как видно из рисунка, в этом случае потенциальный барьер эмиттерного перехода понижается до уровня $\Delta\varphi_s = \varphi_0 - U_{сб}$, а высота потенциального барьера коллекторного перехода увеличивается до уровня $\Delta\varphi_n = \varphi_0 - U_{кб} = \varphi_0 + |U_{кб}|$ (так как $U_{кб} < 0$). Если изменить потенциальные барьеры переходов, то изменятся и распределения концентраций основных и неосновных носителей. В результате в базе возникает градиент концентраций неосновных носителей, под действием которого дырки, инжектированные из эмиттера, диффундируют от эмиттера к коллектору и, достигнув последнего, втягиваются полем коллекторного перехода. В коллекторной цепи транзистора появляется ток

$$I_K = I_{Kp} + I_{K0},$$

где I_{Kp} — дырочный ток коллектора; I_{K0} — тепловой (неуправляемый) ток коллекторного перехода.

Дырочный ток коллектора I_{Kp} связан с дырочным током эмиттера $I_{Эр}$ простым соотношением

$$I_{Kp} = \alpha I_{Эр} \approx \alpha I_{Э}.$$

В современных транзисторах $\alpha = 0,95 - 0,99$ и более. Полный ток коллектора в статическом режиме определяется соотношением

$$I_K = \alpha I_{Э} + I_{K0}.$$

В принципе, управление транзистором может осуществляться либо током эмиттера, либо током базы. При работе транзистора с эмиттерным входом выходной величиной является ток коллектора

$$I_{вых} = I_K = \alpha I_{Э} + I_{K0}.$$

В этом случае входной ток не усиливается (так как $\alpha < 1$), усиление мощности может быть получено только за счет усиления напряжения (в усилительном каскаде).

При управлении током базы выходной величиной может быть либо ток коллектора, либо эмиттера, тогда в первом случае

$$I_{вых} = I_K = \beta I_{Б} + (1 + \beta) I_{K0},$$

а во втором случае

$$I_{вых} = I_{Э} = (1 + \beta) I_{Б} + (1 + \beta) I_{K0},$$

где β — коэффициент передачи тока базы:

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha).$$

Статические режимы работы транзистора наиболее полно можно охарактеризовать с помощью статических входных и выходных характеристик транзистора. Входные характеристики представляют собой зависимость входного тока от входного напряжения при фиксированных значениях выходного напряжения, а выходные характеристики определяют зависимость выходного тока от выходного напряжения при фиксированных значениях входного тока. Та-

ким образом, для всех трех схем включения транзистора можно снять и построить соответствующие семейства входных и выходных характеристик.

Для схемы с общей базой входные характеристики представляют собой зависимость $I_{Э} = f(U_{сб})$ при $U_{кб} = \text{const}$, а выходная зависимость $I_K = f(U_{кб})$ при $I_{Э} = \text{const}$. Семейства характеристик для схемы с ОБ показаны на рис. 15-5, а, б. Как видно из рисунка, входная статическая характеристика при $U_{кб} = 0$ аналогична вольт-амперной

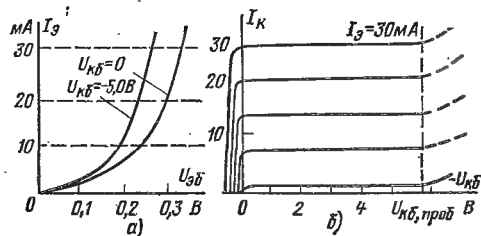


Рис. 15-5. Входные (а) и выходные (б) статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой.

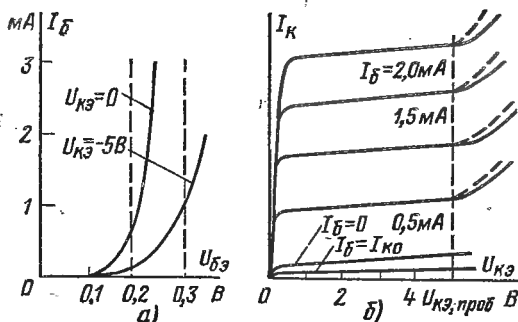


Рис. 15-6. Входные (а) и выходные (б) статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

характеристике обычного диода при прямом смещении и описывается зависимостью, близкой к экспоненциальной. При увеличении отрицательного смещения на коллекторном переходе входная характеристика смещается к оси токов вследствие внутренней обратной связи в транзисторе, обусловленной эффектом модуляции толщин базы.

Выходные характеристики транзистора в схеме ОБ практически не зависят от коллекторного напряжения в области $U_{кб} < 0$, а зависят только от управляющего тока эмиттера. Однако при смещениях, близких к напряжению пробоя $U_{кб,проб}$, происходит лавинообразное увеличение тока коллектора, что может привести к выходу прибора из строя.

Входные характеристики транзистора в схеме ОЭ представляют собой зависимость $I_{Б} = f(U_{сб})$ при фиксированных значениях

$U_{кз}$, а выходные — зависимость $I_{кз} = f(U_{кз})$ при фиксированных значениях $I_б$. Семейства этих характеристик приведены на рис. 15-6, а, б. Выходной ток в схеме с ОЭ зависит от коллекторного напряжения, вследствие чего характеристики имеют больший наклон в области $U_{кз} < 0$, чем аналогичные характеристики в схеме ОБ.

Полевые транзисторы

Полевые транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, ток в которых обусловлен дрейфом основных носителей заряда под действием продольного электрического поля. Управление током в таком приборе осуществляется за счет изменения проводимости полупроводника с помощью поперечного электрического поля.

В настоящее время получили применение две основные разновидности полевых транзисторов: транзисторы с управляющим p - n переходом и транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы); схемные обозначения и графики вольт-амперных характеристик $I_c = f(U_{зз})$ сведены в таблицу и приведены на рис. 15-7. На рис. 15-8 дана упрощенная структура полевого транзистора с управляющим p - n переходом. В исходной пластине полупроводника n -типа на противоположных сторонах методом сплавления (или диффузии) вводятся акцепторные примеси, чтобы образовались области p -типа. Между областями с противоположным типом проводимости образуется p - n переход. Область n -типа, заключенная

между двумя p - n переходами, образует проводящий канал.

Область, от которой начинают движение основные носители в канале, получила название истока, область, к которой движутся основные носители в канале, называется стоком. Области p -типа, используемые для управления током в канале, образуют затвор. В соответствии со сказанным внешние электроды-выводы получили аналогичные названия.

Между затвором и истоком подается напряжение такой полярности, чтобы оно создавало обратное смещение p - n перехода, а напряжение между стоком и истоком имеет такую полярность, чтобы основные носители двигались от истока к стоку. Механизм управления током в транзисторе заключается в следующем. Как известно из теории p - n перехода [15-3], при увеличении обратного смещения на переходе $U_{зи}$ область обедненного слоя будет расширяться и распространяться в область полупроводника n -типа, поскольку для основных носителей в слоях всегда соблюдается условие $p_p \gg n_n$. Так как в обедненном слое практически отсутствуют свободные носители заряда, то электрический ток может быть только в проводящем канале, расположенном между обедненными слоями. Изменяя напряжение $U_{зи}$, можно изменять поперечное сечение проводящего канала, т. е. его проводимость, а следовательно, управлять током транзистора. Другими словами, полевой транзистор можно рассматривать как управляемое сопротивление. Если напряже-

Тип транзистора	С каналом n -типа		С каналом p -типа	
	Полярность напряжений	Вольт-амперная характеристика	Полярность напряжений	Вольт-амперная характеристика
С управляющим p - n переходом				
МДП со встроенным каналом				
МДП с индуцированным каналом				

Рис. 15-7. Схемные обозначения и графики вольт-амперных характеристик $I_c = f(U_{зз})$ полевых транзисторов.

ние $U_{зи}$ будет достаточно велико, то произойдет смыкание обедненных областей и ток транзистора станет равным нулю. Напряжение U_0 , при котором происходит перекрытие канала, называется напряжением отсечки. При нулевом напряжении на за-

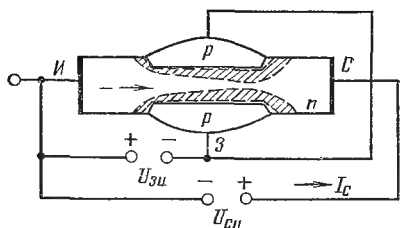


Рис. 15-8. Упрощенная структура полевого транзистора (с каналом n -типа) с управляющим p - n переходом.

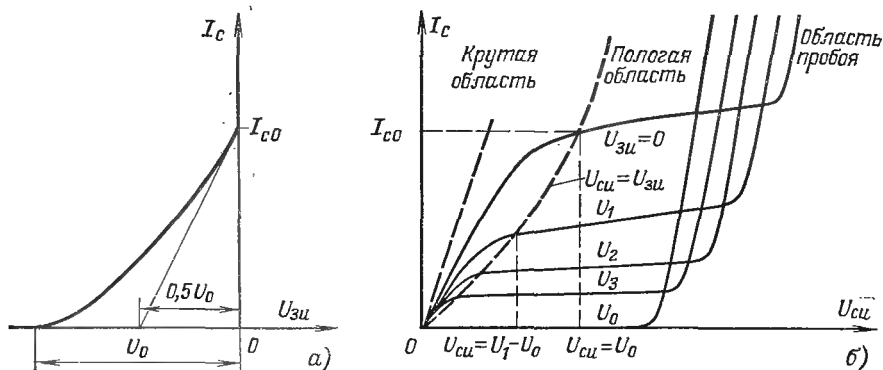


Рис. 15-9. Стоко-затворная (а) и выходные (б) характеристики транзистора с управляющим p - n переходом.

творе (т. е. затвор — исток закорочены) ток транзистора максимальный, $I_{с0}$ — ток насыщения стока (рис. 15-9, а) — практически не зависит от напряжения $U_{си}$.

Последнее объясняется тем, что в рабочем режиме канал не является эквипотенциальным слоем, вследствие того что ток стока вызывает падение напряжения в самом канале, которое создает дополнительное обратное смещение на управляющем p - n переходе. Это способствует уменьшению проводимости канала, в результате чего увеличение напряжения $U_{си}$ не сопровождается пропорциональным увеличением тока стока (рис. 15-9, б). Более того, когда суммарное напряжение на p - n переходе $|U_{зи}| + |U_{си}|$ достигает $|U_0|$, канал почти перекрывается и при дальнейшем увеличении напряжения $U_{си}$ ток стока остается практически неизменным, как показано на рис. 15,9, б.

Ток насыщения $I_{с0}$ и напряжение отсечки U_0 зависят от геометрии прибора, физических параметров полупроводника и распределения примесей в канале.

Полевые транзисторы с изолированным затвором имеют структуру металл — диэлектрик — полупроводник (МДП-транзисторы). Схематически такая структура представлена на рис. 15-10. МДП-транзисторы могут изготавливаться либо на полупроводниковой, либо на диэлектрической подложке. В рассматриваемом случае подложкой служит кремний n -типа. Путем окисления кремния на поверхности подложки образуется тонкий изолирующий слой диэлектрика из двуокиси кремния SiO_2 . Через специальные отверстия в диэлектрике методом диффузии в подложку создаются две области с противоположным типом проводимости, т. е. p -типа. Между областями p и n образуются два p - n перехода. Одна из p -областей используется в качестве стока, а другая — истока. Подложку (ее вывод) обычно соединяют с истоком. Полярности приложенных напряжений при

нормальном включении транзистора показаны на рис. 15-7. При напряжении $U_{зи}=0$ ток стока будет пренебрежимо мал (ток утечки), так как стоковый p - n переход ока-

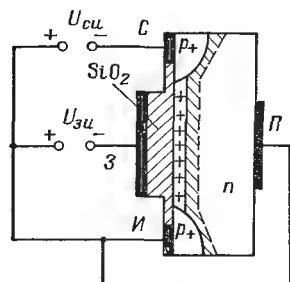


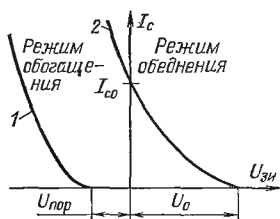
Рис. 15-10. Структура МДП-транзистора.

зывается смещенным в обратном направлении.

При подаче на затвор отрицательного смещения относительно истока электроны,

находящиеся в подложке на границе с диэлектриком, вытесняются в глубь полупроводника и в поверхностном слое подложки образуется проводящий канал p -типа. От подложки канал отделен изолирующим p - n переходом (обедненным слоем), смещенным в обратном направлении. Важно отметить, что канал индуцируется только при некотором пороговом значении напряжения $U_{пор}$. Увеличение напряжения на затворе, т. е. при $|U_{зи}| > |U_{пор}|$, приводит к

Рис. 15-11. Стоко-затворные характеристики МДП-транзистора с индуцированным и встроенным каналами.



увеличению концентрации подвижных носителей — дырок в канале, и ток стока возрастает. В результате стоко-затворная вольт-амперная характеристика МДП-транзистора с индуцированным каналом будет иметь вид, показанный на рис. 15-11 (кривая 1).

Помимо МДП-транзисторов с индуцированным каналом изготавливаются МДП-транзисторы со встроенным каналом. Встроенный канал можно получить, например, путем диффузии примесей в подложку.

В отличие от предыдущего в транзисторе со встроенным каналом ток стока не равен нулю при нулевом смещении на затворе (рис. 15-11, кривая 2). При подаче на затвор транзистора с каналом p -типа отрицательного смещения возрастает концентрация дырок в канале (режим обогащения) и ток стока увеличивается. При положительном смещении на затворе (режим обеднения) ток уменьшается и при напряжении отсечки U_0 становится равным нулю.

Стоковые характеристики МДП-транзисторов по виду подобны аналогичным характеристикам транзисторов с управляющим p - n переходом.

В отличие от биполярного транзистора полевой транзистор управляется напряжением и характеризуется (аналогично электронной лампе) следующей системой дифференциальных параметров:

крутизны характеристики

$$S = \left(\frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right) U_{си} = \text{const};$$

коэффициентом усиления транзистора

$$\mu_T = - \left(\frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \right) I_c = \text{const};$$

внутренним сопротивлением транзистора

$$r_i = \left(\frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \right) U_{зи} = \text{const}.$$

Перечисленные параметры связаны между собой соотношением

$$\mu_T = S r_i.$$

Дифференциальные параметры транзистора приближенно можно определить из его статических характеристик.

Важным низкочастотным дифференциальным параметром полевого транзистора является входное сопротивление

$$r_{вх} = \left(\frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_c} \right) U_{си} = \text{const},$$

где ток затвора I_z для транзистора с p - n переходом определяется обратной вольт-амперной характеристикой p - n перехода. Сопротивление $r_{вх}$ таких транзисторов составляет 10^6 — 10^9 Ом. Для МДП-транзисторов входное сопротивление определяется сопротивлением слоя диэлектрика и может достигать 10^9 — 10^{14} Ом.

Полевые транзисторы подвержены влиянию температуры в меньшей степени, чем биполярные.

Полевые транзисторы аналогично биполярным могут включаться тремя различными способами: по схеме с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ). Обычно схема с общим затвором самостоятельного применения не имеет, а используется в качестве составной части более сложных схем (каскадов).

Эквивалентные схемы биполярных транзисторов

Для расчета транзисторных устройств применяются эквивалентные схемы, приведенные на рис. 15-12, а, б. На рис. 15-12, а приведена эквивалентная схема при эмиттерном управлении (схема ОБ). Здесь эмиттерный и коллекторный переходы представлены в виде диодов, вольт-амперные характеристики которых описываются выражениями

$$I_{э,д} = I_{э0} (e^{U_{эб}/\varphi_T} - 1);$$

$$I_{кд} = I_{к0} (e^{U_{кб}/\varphi_T} - 1),$$

где $I_{э0}$, $I_{к0}$ — тепловые токи изолированных переходов; $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал при 20°C , равный 0,026 В.

Передача тока из эмиттера в коллектор и наоборот учитывается в эквивалентной схеме с помощью двух источников тока $\alpha_N I_z$ и $\alpha_I I_k$, где α_N и α_I — коэффициенты передачи токов соответственно эмиттера в коллектор и коллектора в эмиттер. Таким образом, диоды и источники тока моделируют процессы переноса заряда в базе транзистора. Дополнительные объемные сопротивления $r_{эб}$, $r_{кб}$, $r_б$, введенные в схему, учитывают падения напряжения в толще полупроводника в соответствующей области. В отдельных случаях в схему вводятся сопротивления утечки, шунтирующие p - n переходы (на рис. 15-12 отсутствуют).

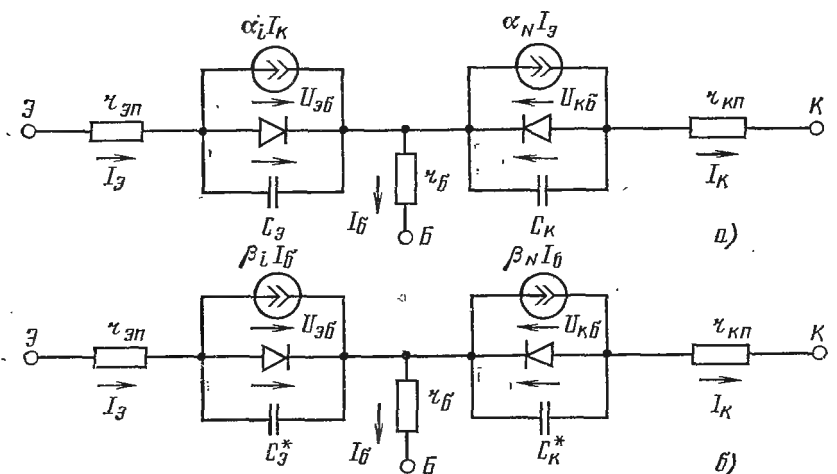


Рис. 15-12. Эквивалентная схема биполярного транзистора при эмиттерном (а) и базовом (б) управлениях.

При управлении транзистором по базовому входу (схема ОЭ) целесообразно преобразовать эквивалентную схему транзистора так, чтобы она отражала управление базовым током, как показано на рис. 15-12, б. Здесь токи $\beta_N I_B = \beta_I I_B$ выражены через коэффициенты передачи тока базы соответственно в коллектор при прямом включении и в эмиттер при инверсном.

В преобразованной схеме тепловые токи переходов изменяются до значений

$$I_{э0}^* = I_{э0} (1 + \beta_I);$$

$$I_{к0}^* = I_{к0} (1 + \beta_N).$$

Приведенные выше эквивалентные схемы можно применять для расчета статических характеристик транзистора в любом режиме работы. В общем случае транзисторы могут работать в четырех качественно различных режимах работы, которые характеризуются определенными полярностями напряжений на переходах транзистора:

1) режим отсечки токов (оба перехода смещены в обратном направлении)

$$U_{эб} < 0; U_{кб} < 0 \text{ для } p\text{-}n\text{-}p \text{ структуры};$$

$$U_{эб} > 0; U_{кб} > 0 \text{ для } n\text{-}p\text{-}n \text{ структуры};$$

2) нормальном активном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный — в обратном)

$$U_{эб} > 0; U_{кб} < 0 \text{ для } p\text{-}n\text{-}p \text{ структуры};$$

$$U_{эб} < 0; U_{кб} > 0 \text{ для } n\text{-}p\text{-}n \text{ структуры};$$

3) режиме насыщения (оба перехода смещены в прямом направлении)

$$U_{эб} > 0; U_{кб} > 0 \text{ для } p\text{-}n\text{-}p \text{ структуры};$$

$$U_{эб} < 0; U_{кб} < 0 \text{ для } n\text{-}p\text{-}n \text{ структуры};$$

4) инверсном активном режиме (эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный — в прямом)

$$U_{эб} < 0; U_{кб} > 0 \text{ для } p\text{-}n\text{-}p \text{ структуры};$$

$$U_{эб} > 0; U_{кб} < 0 \text{ для } n\text{-}p\text{-}n \text{ структуры};$$

Нормальный активный режим работы соответствует усилительному режиму работы транзистора и характеризуется системой физических параметров транзистора.

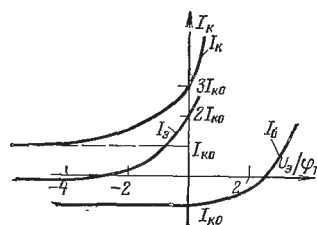


Рис. 15-13. Зависимость токов транзистора от напряжения на эмиттерном переходе в режиме отсечки.

Режим отсечки характеризуется весьма малыми значениями токов переходов транзистора. На рис. 15-13 приведены графики зависимости токов транзистора от напряжения на эмиттерном переходе в режиме отсечки. Как видно из графиков, в режиме глубокой отсечки ($|U_{эб}| \gg \varphi_T$, $|U_{кб}| \gg \varphi_T$) токи транзистора практически могут быть выражены через тепловой ток коллекторного перехода:

$$I_K \approx I_{K0}; I_э \approx -\beta_I I_{K0} / \beta_N; I_б \approx -I_{K0}.$$

На границе режима отсечки и нормального активного режима

$$I_K \approx (1 + \beta_I) I_{K0}; I_э \approx \beta_I I_{K0}; I_б \approx -I_{K0}.$$

Сравнивая приведенные выражения, можно сделать вывод, что ток эмиттера на границе отсечки существенно увеличивает-ся и меняет знак, в то время как ток базы

остается практически неизменным, что иллюстрируется кривыми, приведенными на рис. 15-13.

В режиме насыщения оба p - n перехода транзистора смещены в прямом направлении и напряжения на них не превышают 0,35—0,75 В. В этом режиме токи транзистора I_B , I_K , I_E можно считать заданными компонентами внешних цепей. Наряду с потенциальным критерием насыщения в инженерной практике часто применяют токовый критерий насыщения, который можно получить из анализа нормального активного режима на границе с насыщением. Очевидно,

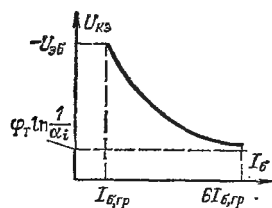


Рис. 15-14. Зависимость напряжения $U_{КБ}$ от управляющего тока.

на границе насыщения (при $U_{КБ}=0$) имеем $I_K = \alpha I_E$, отсюда для режима насыщения ($U_{КБ} > 0$) получим токовый критерий в виде

$$I_B > I_K / \alpha = I_{B,н};$$

где $I_{B,н}$ — эмиттерный ток на границе насыщения.

При управлении по базовому входу соответственно

$$I_B > I_K / \beta = I_{B,гр},$$

где $I_{B,гр}$ — граничное значение базового тока.

Для характеристик «глубины насыщения» вводится дополнительный параметр — степень насыщения

$$N = \frac{I_{вх} - I_{вх,гр}}{I_{вх,гр}},$$

где $I_{вх,гр}$ — граничное значение тока насыщения для конкретной схемы управления (ОБ или ОЭ).

Помимо междуэлектродных напряжений $U_{ЭБ,н}$ и $U_{КБ,н}$ насыщенного транзистора важной величиной в режиме насыщения является «остаточное» напряжение между коллектором и эмиттером $U_{КЭ,н}$. Это напряжение существенно зависит от управляющего тока. В качестве примера на рис. 15-14 приведен график зависимости остаточного напряжения идеализированного транзистора ($r_{ЭБ} = r_{КБ} = r_{БЭ} = 0$) при включении его по схеме ОЭ.

Эквивалентные схемы, приведенные на рис. 15-12, в принципе можно применять не только для расчета статических режимов работы транзистора, но и для анализа переходных процессов. При этом необходимо учитывать комплексный характер парамет-

ров транзистора β_N и β_I , влияние емкостей p - n переходов, а также паразитных междуэлектродных емкостей. Инерционность транзистора прежде всего определяется процессами переноса неосновных носителей через область базы.

Малосигнальные схемы замещения транзистора (для комплексных значений), полученные на базе эквивалентных схем для большого сигнала, приведены на рис.

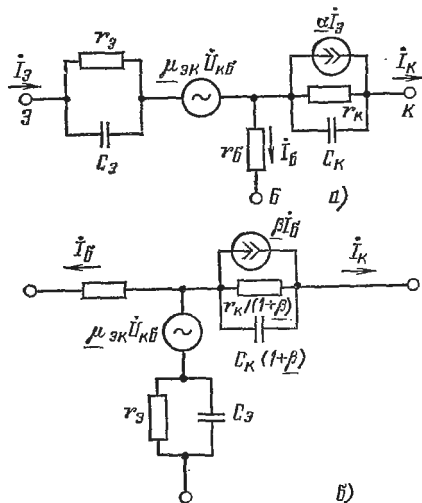


Рис. 15-15. Малосигнальные схемы замещения биполярного транзистора, включенного по схемам ОБ (а) и ОЭ (б).

15-15, а, б. Здесь эмиттерный переход представлен дифференциальным сопротивлением $r_{ЭБ}$. В коллекторную цепь введено дифференциальное сопротивление $r_{КБ}$, отражающее влияние модуляции толщины базы на коэффициент передачи тока. Коэффициенты передачи тока α и β в эквивалентных схемах рис. 15-15 также представляют собой дифференциальные величины. Модуляция толщины базы при изменении коллекторного напряжения, имеющая место в транзисторе, приводит не только к изменению коэффициентов передачи тока, но также и к изменению напряжения на эмиттерном переходе. Другими словами, в транзисторе имеет место внутренняя обратная связь по напряжению, которая в эквивалентной схеме замещения учитывается при помощи генератора напряжения $\mu_{ЭБ} U_{КБ}$, включенного в эмиттерную цепь. В некоторых случаях внутренняя обратная связь учитывается путем включения фиктивного диффузионного сопротивления в базовую цепь последовательно с объемным сопротивлением базы $r_Б$ [15-5]. Реактивные элементы $C_Э$ и $C_К$ учитывают влияние токов заряда или разряда переходов в области высоких частот. При анализе большинства практических схем влияние емкости эмиттера можно пренебречь, тем самым упростив эквивалентную схему замещения.

$C_{зс}$, затвор — исток $C_{зи}$, подложка — исток $C_{пн}$ и подложка — сток $C_{пс}$ представляют собой барьерные емкости обратно смещенных $p-n$ переходов — затвор — канал и подложка — канал. Для МДП-транзисторов аналогичные емкости $C_{зи}$ и $C_{зс}$, $C_{пн}$ определяются емкостями распределенной структуры полупроводника и паразитными междуэлектродными емкостями. Емкости $C_{пн}$,

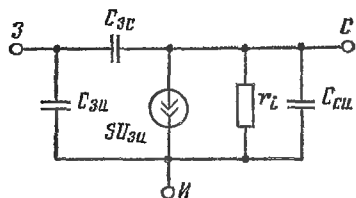


Рис. 15-18. Упрощенная эквивалентная схема полевого транзистора.

$C_{пс}$ представляют собой барьерные емкости соответствующих $p-n$ переходов. В тех случаях, когда полевые транзисторы выпускаются в дискретном исполнении, у МДП-транзистора обычно подложку соединяют с истоком, а у транзистора с управляющим переходом — с затвором, тогда эквивалентная схема замещения упрощается и выглядит, как показано на рис. 15-18.

Эквивалентные схемы замещения рис. 15-17 и 15-18 справедливы в широком диапазоне частот (до 50—100 МГц). В режиме большого сигнала для расчетов значений напряжений и токов в транзисторе в принципе можно использовать эквивалентную схему, приведенную на рис. 15-18, однако при этом надо учитывать нелинейную зависимость параметров схемы замещения от напряжений на электродах прибора. В большинстве случаев оказывается достаточным учесть только нелинейную зависимость статических параметров транзистора от режима работы. Междуэлектродные емкости незначительно зависят от напряжений на зажимах прибора, и при расчетах можно пользоваться их усредненными значениями. В режиме малого сигнала транзистор можно рассматривать как линейный четырехполюсник и характеризовать системой дифференциальных параметров, рассмотренной ранее.

15-3. ТИРИСТОРЫ

Тиристоры относятся к классу так называемых переключающих полупроводниковых приборов. Статическая вольт-амперная характеристика этих приборов имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, который обусловлен сильной внутренней положительной обратной связью, возникающей при прохождении тока через структуру $p-n-p-n$ с тремя $p-n$ переходами. Вследствие этого тиристоры в зависимости от приложенного к ним напряжения и сопротивления внешней цепи могут

находиться в двух устойчивых электрических состояниях: открытом (с большой проводимостью) и закрытом (с малой проводимостью).

Диодные тиристоры (динисторы) имеют два вывода от крайних областей структуры.

Схема устройства и включения диодного тиристора показана на рис. 15-19, а.

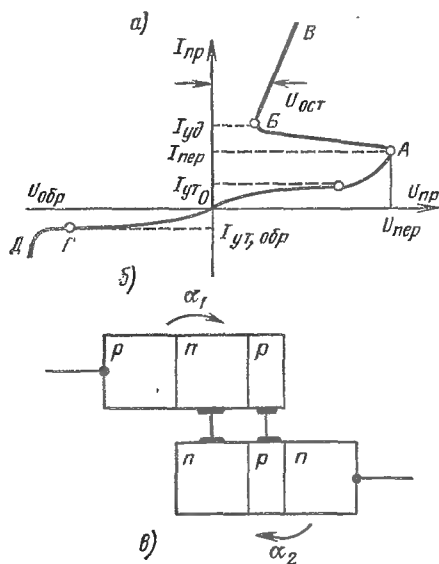
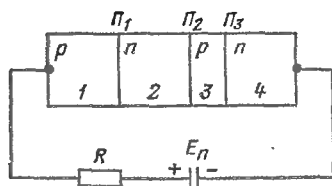


Рис. 15-19. Структура и схема включения (а), вольт-амперная характеристика (б) и двухтранзисторная модель (в) диодного тиристора.

Источник питания смещает переходы P_1 и P_3 в прямом направлении, а P_2 — в обратном. Когда динистор находится в закрытом состоянии, практически все приложенное к нему напряжение (оно называется прямым напряжением $U_{пр}$) падает на переходе P_2 .

Средние области 2 и 3 структуры имеют ширину, соизмеримую с диффузионными длинами неосновных носителей заряда. Поэтому дырки и электроны, инжектируемые переходами P_1 и P_3 , вследствие диффузии могут достигать центрального перехода P_2 . Ток $I_{п2}$ перехода P_2 является суммой трех токов:

$$I_{п2} = I_{обр} + I_{п1} a_1 + I_{п3} a_2,$$

где $I_{обр}$ — обратный ток перехода P_2 ; $I_{п1} a_1$ — ток дырок, инжектированных пере-

ходом P_1 и достигших перехода P_2 ; $I_{пз}a_3$ — ток электронов, инжектированных переходом P_3 и достигших перехода P_2 .

Так как переходы включены последовательно, то токи переходов, а также ток I во внешней цепи равны между собой, т. е.

$$I_{п2} = I_{п3} = I,$$

откуда следует, что

$$I = \frac{I_{обр}}{1 - a_1 - a_2} = \frac{I_{обр}}{1 - a},$$

где $a = a_1 + a_2$.

Через a_1 и a_2 обозначены соответственные доли дырок и электронов, инжектированных переходами P_1 и P_3 и достигших перехода P_2 . Обычно при анализе четырехслойной структуры ее условно представляют составленной из двух транзисторных структур: $p-n-p$ и $n-p-n$ (рис. 15-19, в), тогда a_1 и a_2 называются коэффициентами передачи тока в схеме ОБ составляющих транзисторных структур.

В неявном виде последнее соотношение представляет собой выражение статической вольт-амперной характеристики динистора, так как $I_{обр}$, a_1 и a_2 зависят от напряжения на переходе P_2 .

Зависимость $I_{обр}$, a_1 и a_2 от напряжения, обусловлена главным образом умножением носителей заряда в электрическом поле перехода P_2 , когда напряжение на нем U_2 близко к напряжению лавинного пробоя $U_{лн}$. Коэффициент умножения M при этом равен:

$$M = \frac{1}{1 - (U_2/U_{лн})^n}.$$

Для электронов и дырок в кремнии $n \approx 3$.

Коэффициенты a_1 и a_2 меньше единицы, зависят от токов переходов P_1 и P_3 .

Вольт-амперная характеристика динистора изображена на рис. 15-19, б. Спецификой ее является наличие участка AB с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Участок OA характеристики соответствует закрытому состоянию прибора. Ток прибора равен току утечки $I_{ут}$, значение которого может составлять от сотых долей микроампера до нескольких микроампер. Дифференциальное сопротивление структуры на этом участке положительно и обычно достигает сотен мегаом. При повышении температуры дифференциальное сопротивление уменьшается. Когда напряжение достигает напряжения переключения $U_{пер}$ (оно близко к напряжению лавинного или туннельного пробоя перехода P_2), ток динистора резко возрастает. Дифференциальное сопротивление структуры становится равным нулю.

При дальнейшем увеличении тока (участок AB) положительным значениям приращений тока dI соответствуют отрицательные значения приращений dU . Дифференциальное сопротивление структуры на

этом участке характеристики отрицательно.

Процесс возникновения отрицательного сопротивления в тиристоре происходит под влиянием положительной обратной связи в структуре, обеспечиваемой усилением составляющих транзисторов. Характеристика на участке с отрицательным наклоном должна сниматься с помощью источника постоянного напряжения с достаточно большим внутренним сопротивлением. Если же сопротивление генератора недостаточно велико, происходит скачок тока и рабочая точка быстро перемещается на участок с положительным наклоном, соответствующий проводящему состоянию прибора.

При некотором значении тока, равном току удержания $I_{уд}$, напряжение на переходе P_2 становится равным нулю.

Дифференциальное сопротивление динистора вблизи тока, равного $I_{уд}$, снова обращается в нуль. Значение $I_{уд}$ определяет минимальный ток, при котором еще поддерживается проводящее состояние динистора. Выключение динистора осуществляется путем уменьшения тока до значения ниже $I_{уд}$. При токе, большем $I_{уд}$, напряжение на переходе P_2 становится прямым и вычитается из суммы напряжений, падающих на переходах P_1 и P_3 . Участок BB характеристики соответствует открытому состоянию динистора. Падение напряжения на нем называется остаточным напряжением $U_{ост}$ и составляет несколько десятых долей вольта.

В зависимости от конструкции сопротивление лежит в диапазоне от 0,001 Ом (для мощных приборов) до нескольких Ом (для маломощных). На участке BB переход P_2 , смещенный в прямом направлении, инжектирует электроны и дырки навстречу потокам из переходов P_1 и P_3 . Это соответствует режиму насыщения составляющих транзисторных структур.

Если к динистору приложено обратное напряжение $U_{обр}$, переход P_2 открыт, а P_1 и P_3 закрыты. В этом состоянии в приборе имеет место обратный ток $I_{обр}$. При увеличении $U_{обр}$ происходит пробой переходов P_1 и P_3 , и ток в динисторе резко возрастает (участок $ГД$ характеристики). Максимальное обратное напряжение $U_{обтmax}$ определяется типом переходов P_1 и P_3 и конструкцией прибора.

Триодные тиристоры кроме выводов от крайних областей (анода и катода) имеют также третий, управляющий вывод от одной из средних (базовых) областей, как показано на рис. 15-20, а.

Ток перехода P_3 определяется управляющим током $I_{упр}$.

Общий вид вольт-амперной характеристики триодного тиристора показан на рис. 15-20, б.

Наличие управляющего тока приводит к тому, что напряжение включения тиристора уменьшается, так как условие включения его выполняется при более низком напряжении. При управляющем токе $I_{упр} = I_{сп}$ вольт-амперная характеристика спрямляется и тиристор переходит в прово-

дающее состояние. В зависимости от типа тиристора ток спрямления $I_{спр}$ может составлять от нескольких микроампер до нескольких десятков миллиампер (для мощных приборов).

Быстродействие тиристорov принято характеризовать временем их выключения $t_{вкл}$ и временем выключения $t_{выкл}$. За время $t_{вкл}$ принимается интервал времени от начала действия управляющего импульса до момента времени, когда анодный ток нарастает до уровня 0,9 установившейся вели-

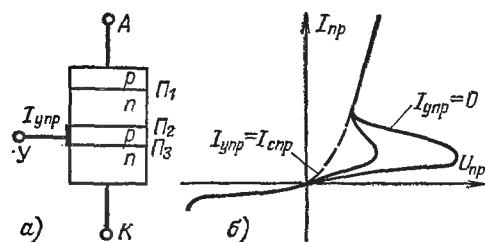


Рис. 15-20. Структура (а) и вольт-амперная (б) характеристика триодного тиристора.

чины. Время включения главным образом зависит от инерционности транзисторной составляющей структуры с более широкой базой (обычно $p-n-p$) и несколько уменьшается при увеличении амплитуды тока управляющего импульса. Для маломощных тиристорov время включения $t_{вкл}$ составляет 1—10 мкс, а для тиристорov средней мощности и мощных — несколько десятков микросекунд.

За время выключения $t_{выкл}$ принимается обычно минимальное время, в течение которого к тиристорy должно прикладываться запирающее напряжение (или он должен находиться в обесточенном состоянии), после чего тиристор запирается и к нему вновь может быть приложено прямое напряжение. Время выключения определяется процессом рекомбинации носителей заряда (дырок) в базе $p-n-p$ транзистора.

Значение $t_{выкл}$ составляет для маломощных тиристорov 10—30 мкс, для мощных достигает 100—200 мкс. Чем меньше $t_{выкл}$, тем ниже напряжение $U_{вкл}$ тиристора. Отношение $U_{вкл}/t_{выкл}$ обычно равно 140—330 В/мкс. Выключение триодных тиристорov, так же как и динисторov, как правило, производится за счет уменьшения анодного тока до значения ниже $I_{уд}$ за время не меньше $t_{выкл}$. Некоторые тиристоры (называемые запираемыми тиристорами) могут выключаться при подаче запирающего импульса тока в базу. Амплитуда запирающего импульса значительно больше, чем $I_{спр}$. Например, для выключения анодного тока $I_{пр} = 2$ А в базу типичного запираемого тиристора средней мощности необходимо подать импульс тока 360 мА длительностью 50 мкс при напряжении 36 В ($I_{спр}$ и $U_{спр}$ для этого прибора равны 100 мА и 3 В соответственно).

Обратная характеристика триодного тиристора такая же, как и у динистора, и определяется главным образом свойствами перехода Π_1 , так как переход Π_3 , как правило, зашунтирован встроенным в структуру резистором. Для обратной ветви задаются $U_{обр,таж}$ и обратный ток утечки $I_{ут,обр}$.

Тиристоры средней и большой мощности чаще всего изготавливаются методом диффузии или сплавления-диффузии.

На рис. 15-21 показана вольт-амперная характеристика симметричного тиристора (триака).

В табл. 15-3 приводятся справочные данные по силовым триодным тиристорам.

Выпускаются также симметричные тиристоры (триаки). Последние имеют в основе тиристорную структуру с двумя равноправными главными выводами и выводом от управляющего электрода, подача управляющего сигнала на который переводит симметричный тиристор в открытое состояние для любого направления тока в зависимости от приложенного напряжения.

Выпускаются симметричные тиристоры (триаки) следующих типов: TC161-100, T14-100, TC161-125, T14-125, TC161-160, T14-160, TC171-200, TC14-200, TC171-250, TC14-250 с действующим током в открытом состоянии $I_{ТАВ}$, А, входящим в обозначение типа. Тиристоры имеют ударные неповторяющиеся токи в открытом состоянии $I_{ТСМ}$ 1; 1,2; 1,6; 1,8; 2,0 кА соответственно. Повторяющийся импульсный обратный ток I_{RRM} и равный ему повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии I_{DRM} составляют 15 мА. Все тиристоры могут иметь повторяющееся импульсное обратное

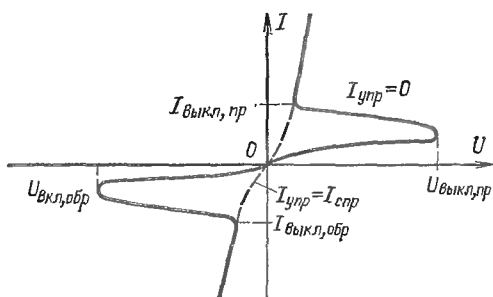


Рис. 15-21. Вольт-амперная характеристика симметричного тиристора.

напряжение U_{RRM} и равное ему повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии U_{DRM} 200—1200 В. Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии $(dU_D/dt)_{кр} = 10 \div 1000$ В/мкс. Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии $(di_D/dt)_{кр} = 5 \div 50$ А/мкс. Отпирающее напряжение на управляющем электроде 5 В. Температура структуры $T_j = 110^\circ$ С. Тепловое сопротивление структура — корпус $R_{thj-c} = 0,2 \div 0,15^\circ$ С/Вт. Допустимая частота 2000 Гц.

Таблица 15-3

Силовые тиристоры

Тип	I_{TSM}^* , кА	I_{RRM}^* , мА	M^* , кг	R_{thj-c}^* , °C/Вт
T112-10	0,15	2,5	0,007	1,85
T112-16	0,20	3	0,007	1,8
T112-25	0,35	5	0,012	0,9
T112-32	0,38	5	0,012	0,8
T132-40	0,75	5	0,027	0,72
T132-50, ТБ151-50	0,8 (1)	6 (20)	0,027 (0,18)	0,7 (0,32)
T142-63, ТБ151-63	1,2 (1,1)	6 (20)	0,053 (0,18)	0,4 (0,32)
T142-80, ТБ161-80	1,35 (2,2)	6 (30)	0,053 (0,29)	0,15
T161-100, ТБ161-100	2 (2,5)	15 (30)	0,29	0,15 (0,2)
T161-125	2,5	15	0,29	0,15
T161-160, ТБ161-160	3,3 (4)	15 (40)	0,29 (0,51)	0,15 (0,12)
T171-200, ТБ-171-200	5 (5,2)	30 (40)	0,56 (0,51)	0,1 (0,12)
ТБ133-200	5,2	40	0,21	0,08
T171-250, ТБ133-250	6 (5,5)	30 (40)	0,56 (0,21)	0,1 (0,08)
T133-320, ТБ143-320	6	35 (50)	0,2 (0,28)	0,045 (0,05)
T133-400	7	30	0,2	0,045
T143-400, ТБ143-400	8 (7)	50 (60)	0,29 (0,28)	0,034 (0,05)
T143-600	10	30	0,29	0,034
T153-630, ТБ153-630	14 (10)	50 (70)	0,61 (0,55)	0,026 (0,03)
T143-630	12	30	0,29	0,034
ТБ153-800	12	70	0,55	0,03
T253-1000	20	70	0,61	0,024

* I_{TSM} — ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии; I_{RRM} — повторяющийся импульсный обратный ток; M — масса; R_{thj-c} — тепловое сопротивление структура — корпус.

Примечания: 1. ТБ — быстродействующие тиристоры (при расхождении данные приведены в скобках).

2. Средний ток в открытом состоянии I_{TAV} , А, содержится в марке прибора. Температура корпуса $T_c = 85^\circ\text{C}$ и температура структуры $T_j = 125^\circ\text{C}$ для всех приборов. Импульсное прямое напряжение в открытом состоянии $U_{TM} = 1,65 \div 1,85$ В для серии Т до 250 А, $1,75 \div 2,1$ В для 320—1000 А, $1,75 \div 2,4$ В для серии ТБ. Повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} и повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии $U_{DRM} = 100 \div 1200$ В для Т112-10—Т142-80, $300 \div 1600$ В для Т161-100—Т171-320, $900 \div 2000$ В для Т133-320, $400 \div 1600$ В для Т133-400 и Т143-500, $1300 \div 2400$ В для Т153-630, $400 \div 1200$ В для Т143-630, $1000 \div 1800$ В для Т253-1000, $700 \div 1200$ В для серии ТБ. $(du_D/dt)_{crit} = 50 \div 1000$ В/мкс, но Т133-320, Т133-400, Т153-630 и Т253-1000 могут иметь до 2500 В/мкс. $(di_T/dt)_{crit} = 100$ А/мкс для Т112-10—Т142-80, $20 \div 400$ А/мкс для Т161-100—Т171-320, $700 \div 1200$ А/мкс для серии ТБ. Отпирающее напряжение на управляющем электроде $U_{GT} = 2,2 \div 4$ В для всех тиристоров. Время выключения по основной цепи $t_q = 16 \div 63$ мкс для всех ТБ. Время выключения по управляющему электроду $2 \div 3,5$ мкс для всех ТБ.

3. Тиристоры Т133, Т143, Т153, Т253, ТБ133, ТБ143 и ТБ153 имеют таблеточную конструкцию,

Масса $0,33$ кг для тиристоров до 160 А и $0,56$ кг для 200 и 250 А. Время выключения по основной цепи $t_q = 70 \div 250$ мкс.

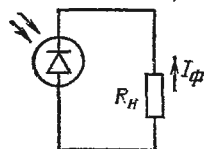
проводимость. Неосновные же носители, приблизившись к p - n переходу, увлекаются его полем и перемещаются в другую область полупроводника, где оказываются основными. Таким образом, в результате ос-

15-4. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Вентильные фотоэлементы и фотодиоды

В отличие от фоторезисторов (см. § 3-1), способных изменять ток в цепи независимого источника электрической энергии, вентильные фотоэлементы и фотодиоды сами создают ЭДС, зависящую от освещенности. Действие этих приборов основано на фотогальваническом эффекте, который в присутствии p - n перехода приводит к неравномерному распределению по объему полупроводника генерируемых светом электронов и дырок. Поглощение кванта световой энергии сопровождается одновременным появлением пары электрона и дырки. Носители заряда, которые являются основными в данной области полупроводника, не могут преодолеть потенциальный барьер p - n перехода и увеличивают ее

Рис. 15-22. Схема включения фотодиода.



вещения полупроводника с p - n переходом возрастает концентрация электронов в n -области и дырок в p -области, что и приводит к появлению фото-ЭДС. Схема включения фотодиода приведена на рис. 15-22.

Фототранзисторы

Биполярный фототранзистор имеет структуру, аналогичную структуре обычного биполярного транзистора, но конструктивно

Продолжение табл. 15-4

Функции, выполняемые интегральными микросхемами	Буквенное обозначение	
	по ГОСТ 18682-73	принятое до введения ГОСТ
<i>Схемы задержки</i>		
Пассивные	БМ	—
Активные	БР	—
Прочие	БП	—
<i>Схемы селекции и сравнения</i>		
Амплитудные (уровня сигнала)	СА	СА
Временные	СВ	СВ
Частотные	СС	СС
Фазовые	СФ	СФ
Прочие	СП	—
<i>Триггеры</i>		
JK-типа	ТВ	—
RS-типа	ТР	ТР
D-типа	ТМ	—
T-типа	ТТ	ТС
Динамические	ТД	ТД
Шмита	ТЛ	ТЛ
Комбинированные (DT, RST и др.)	ТК	ТК
Прочие	ТП	—
<i>Усилители</i>		
Высокой частоты	УВ	—
Промежуточной частоты	УР	—
Низкой частоты	УН	—
Импульсных сигналов	УИ	УИ
Повторители	УЕ	УЭ
Считывания и воспроизведения	УЛ	—
Индикации	УМ	—
Постоянного тока	УТ	УТ
Синусоидальных сигналов	—	УС
Видеоусилители	—	УБ
Операционные и дифференциальные	УД	—
Прочие	УП	—
<i>Фильтры</i>		
Верхних частот	ФВ	ФВ
Нижних частот	ФН	ФН
Полосовые	ФЕ	ФП
Режекторные	ФР	ФС
Прочие	ФП	—
<i>Элементы запоминающих устройств</i>		
Матрицы-накопители оперативных запоминающих устройств	РМ	—
Матрицы-накопители постоянных запоминающих устройств	РВ	—
Матрицы-накопители оперативных запоминающих устройств со схемой управления	РУ	—
Матрицы-накопители постоянных запоминающих устройств со схемой управления	РЕ	—
Элементы памяти	—	ЯП
Матрицы разного назначения	—	ЯМ
Прочие	РП	—

Продолжение табл. 15-4

Функции, выполняемые интегральными микросхемами	Буквенное обозначение	
	по ГОСТ 18682-73	принятое до введения ГОСТ
<i>Элементы арифметических и дискретных устройств</i>		
Регистры	ИР	ИР
Сумматоры	ИМ	ИС
Полусумматоры	ИЛ	ИЛ
Счетчики	ИЕ	ИЕ
Шифраторы	ИВ	ИШ
Дешифраторы	ИД	ИД
Комбинированные	ИК	ИК
Прочие	ИП	ИП
<i>Многофункциональные МС²</i>		
Аналоговые	ХА	ЖА
Цифровые	ХЛ	ЖЛ
Комбинированные	ХК	—
Прочие	ХП	—
<i>Микросборки, наборы элементов</i>		
Диодов	НД	НД
Транзисторов	НТ	НТ
Резисторов	НР	НС
Конденсаторов	НЕ	НЕ
Комбинированные	НК	НК
Прочие	НП	—

три группы, которым присвоены следующие обозначения: 1; 5; 7 — полупроводниковые; 2; 4; 6; — гибридные; 3 — прочие (плёночные, вакуумные, керамические и т. д.).

Условное обозначение типа интегральной микросхемы состоит из четырех элементов:

первый элемент — цифра, указывающая конструктивно-технологическое исполнение микросхемы (полупроводниковая, гибридная);

второй элемент — две цифры, обозначающие порядковый номер разработки серии микросхем (от 00 до 99);

третий элемент — две буквы, обозначающие функциональное назначение микросхемы согласно табл. 15-4;

четвертый элемент — порядковый номер разработки микросхемы по функциональному признаку в данной серии.

Первый совместно со вторым элементом указывает номер серии микросхем. В обозначениях конструктивно-технологических серий, разработанных до июля 1974 г., первая из трех цифр стоит в начале обозначения типа, а вторая и третья — после буквенного индекса; буквенные обозначения функционального назначения микросхем этих серий приведены в крайней правой графе табл. 15-6.

Пример 1. Обозначение типа полупроводниковой логической микросхемы И—НЕ/ИЛИ—НЕ с порядковым номером разработки серии 21 и номером в серии по функциональному признаку 1. согласно ГОСТ: 121ЛБ1.

Интегральные микросхемы, разработанные для радиоэлектронных устройств широкого применения, имеют в начале условного обозначения дополнительный индекс К.

При наличии разброса отдельных электрических параметров и предельных эксплуатационных параметров одного и того же типа микросхем в конце условного обозначения проставляется дополнительная буква (от А до Я). При маркировке микросхем на их корпусах конечная буква может заменяться цветной точкой. Конкретные значения разброса параметров микросхем и цвет маркировочной точки указываются в соответствующей документации.

15-6. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Операционный усилитель (ОУ) — узел, который служит основой построения схем, выполняющих различные функции. Первоначально ОУ были разработаны для выполне-

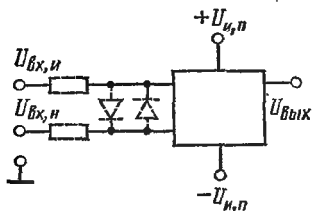


Рис. 15-25. ОУ с ограничителем входного сигнала.

ния линейных операций: усиления сигнала, алгебраического суммирования нескольких сигналов, преобразования сопротивлений, интегрирования и дифференцирования. Однако они оказались удобными и для выполнения таких функций, в которых используются нелинейные свойства: ограничение сигнала, сравнение уровней двух сигналов, замыкание и размыкание цепей, связанных с выходом ОУ. На основе нелинейных свойств ОУ выполняются компараторы, формирователи импульсов, импульсные генераторы, генераторы гармонического и линейно-изменяющегося напряжений. Такое богатство функциональных возможностей привело к тому, что выпуск интегральных ОУ непрерывно растет, они являются перспективным классом интегральных схем, и их целесообразно использовать в устройствах управления и устройствах преобразования информации.

Всякий ОУ (в дальнейшем будем иметь в виду ОУ в интегральном исполнении) представляет собой конструктивный элемент, имеющий следующие выводы: общий («земля»), положительный и отрицательный выводы питания, два входных и один выходной (рис. 15-25). У некоторых ОУ имеются и другие выводы, выполняющие вспомогательные функции.

Основные параметры ОУ

Коэффициент усиления напряжения — отношение приращений выходного и входного напряжений. Входное измеряется между двумя входами либо между одним входом и общей шиной при неизменном потенциале второго входа. Один из входов ОУ — инвертирующий, он изменяет фазу входного сигнала на противоположную, второй — неинвертирующий (прямой):

$$K_{и} = -U_{вых}/U_{вх,и}; \quad K_{н} = U_{вых}/U_{вх,н}.$$

Усилители выполняют симметричные, т. е.

$$|K_{и}| = K_{н} = K.$$

Типичные значения $K = 10^3 \div 10^5$.

Входное сопротивление $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх}$ — измеряется для одного из входов при неизменном потенциале другого. Оно характеризуется, в какой мере входная цепь усилителя нагружает источник входного сигнала. Идеальным следует считать такой усилитель, который не нагружает источник сигнала, т. е. имеет $R_{вх} = \infty$. На практике $R_{вх} = 10^3 \div 10^6$ Ом.

Входное сопротивление для синфазного сигнала $R_{сф} = U_{сф}/I_{сф}$ — отношение приращения напряжения на обоих входах по отношению к «земле» к приращению среднего входного тока:

$$R_{сф} \gg R_{вх}.$$

Средний $I_{вх}$ и разностный $\Delta I_{вх}$ входные токи измеряются в режиме, когда выходное напряжение становится равным нулю:

$$I_{вх} = \frac{I_{и} + I_{н}}{2}; \quad \Delta I_{вх} = |I_{и} - I_{н}|.$$

У идеального усилителя $I_{вх} = 0$; на практике оба тока не превышают единиц микроампер.

Учитывая, что

$$U_{вых} = U_{вх,н} K_{н} + U_{вх,и} K_{и} = K (U_{вх,и} - U_{вх,н}),$$

одинаковые по фазе сигналы на обоих входах практически не влияют на выходное напряжение. Коэффициент ослабления синфазного сигнала — отношение коэффициента усиления к коэффициенту передачи синфазного сигнала — составляет $10^2 - 10^5$.

Выходное сопротивление $R_{вых}$ показывает, насколько выходная цепь ОУ отличается от источника напряжения. У идеального усилителя $R_{вых} = 0$, на практике $R_{вых} = 10^2 \div 10^3$ Ом, но всегда $R_{вых} \ll R_{вх}$. Выходное напряжение ОУ не может быть выше, чем положительное напряжение питания, и ниже, чем отрицательное. На практике $|U_{вых}| \leq (0,5 \div 0,8) |U_{и,п}|$, где $U_{и,п}$ — напряжение источника питания.

Из-за несовершенства усилителя его выходное напряжение может отличаться от нуля, если $U_{вх} = 0$. Для приведения к нулю выхода на вход должно быть подано напряжение смещения $U_{см}$. Его значение и

Таблица 15-5

Обозначение параметра	1УТ401А	1УТ401Б	1УТ402	К1УТ402А	К1УТ402Б
$U_{\text{ИП1}}$, В (вывод 7)	+6,3	+12,6	+12,6	+12,6	+6,3
$U_{\text{ИП2}}$, В (вывод 1)	-6,3	-12,6	-12,6	-12,6	-6,3
K	800—4000	2000—10 500	3500—15 000	20 000—200 000	3000—35 000
$I_{\text{ВХ}}$, мкА, не более	5,0	8,0	0,7	1,5	1,5
$U_{\text{СМ}}$, мВ, не более	$\pm 7,0$	$\pm 7,0$	$\pm 5,0$	± 10	± 10
$\Delta I_{\text{ВХ}}$, мкА, не более	1,5	1,5	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
$K_{\text{О, с, сф}}$, дБ, не менее	60	60	80	—	—
$U_{\text{ВЫХ}}$, В	+3,5 -3,0	+8,0 -6,3	± 10	± 10	$\pm 3,0$
$R_{\text{ВХ}}$, кОм, не менее	4	4	300	—	—
$R_{\text{ВЫХ}}$, Ом, не более	700	700	—	—	—
$U_{\text{ВХ}}$, В, не более	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 4,0$	$\pm 4,0$	$\pm 2,0$
$R_{\text{Н}}$, кОм, не менее	5,1	5,1	1,0	1,0	1,0

Таблица 15-6

Обозначение параметра	1УТ531	К1УТ531А	К1УТ531Б
K	$(20-80) \times 10^3$	$(15-80) \times 10^3$	$(10-100) \times 10^3$
$I_{\text{ВХ}}$, мкА, не более	0,6	1,5	20
$U_{\text{СМ}}$, мВ, не более	± 5	$\pm 7,5$	$\pm 7,5$
$\Delta I_{\text{ВХ}}$, мкА, не более	0,25	0,5	0,6
$K_{\text{О, с, сф}}$, дБ, не менее	65	65	65
$U_{\text{ВЫХ}}$, В, не менее	± 10	± 10	$\pm 9,0$
$R_{\text{ВХ}}$, кОм, не менее	100	100	100
$R_{\text{ВЫХ}}$, Ом, не более	200	200	200
$U_{\text{сф, вх}}$, В, не более	$\pm 8,0$	$\pm 8,0$	$\pm 8,0$
$U_{\text{ВХ}}$, В, не более	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$
$R_{\text{Н}}$, кОм, не менее	2,0	2,0	2,0

температурный дрейф указаны в паспорте. Основные данные наиболее распространенных ОУ приведены в табл. 15-5 и 15-6.

Для ограничения входного напряжения на допустимом уровне между входами часто присоединяют встречно-параллельные кремниевые диоды и резисторы (пунктир на рис. 15-25).

Обратные связи в ОУ

Свойства усилителей, в том числе ОУ, можно изменять, вводя обратную связь, т. е. подавая на входные выводы усилителя сумму входного и части выходного сигналов; ОУ используются обычно с отрицательной обратной связью (рис. 15-26).

Вследствие этого коэффициент усиления схемы

$$K_{\text{О, с}} = -U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} < K.$$

Учитывая также, что $K \gg 1$, можно считать, что

$$U \ll U_{\text{ВЫХ}}; \quad U \ll U_{\text{ВХ}},$$

тогда

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{О, с}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} = -\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{О, с}}}, \quad K_{\text{О, с}} = \frac{R_{\text{О, с}}}{R_1}.$$

Таким образом, $K_{\text{О, с}}$ не зависит от параметров усилителя и полностью определя-

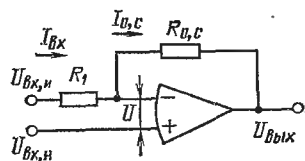


Рис. 15-26. ОУ с отрицательной обратной связью.

ется параметрами внешней цепи. На выбор $R_{\text{О, с}}$ и R_1 накладываются следующие ограничения: $R_{\text{О, с}}$ ограничено сверху значением, при котором $I_{\text{О, с}} \gg I$, а снизу — допустимой нагрузкой усилителя на выходе, практически $R_{\text{О, с}} < 1$ МОм; R_1 ограничено снизу допустимой нагрузкой для источника сигнала, практически $R_1 \geq 5$ кОм. Входное сопротивление усилителя $R_{\text{ВХ, О, с}} = R_1$. Выходное сопротивление из-за отрицательной обратной связи уменьшается и составляет:

$$R_{\text{ВЫХ, О, с}} = R_{\text{ВЫХ}} \frac{K_{\text{О, с}}}{K}.$$

Для входного сигнала, поданного в схеме рис. 15-26 на неинвертирующий вход, $K_{\text{О, с, н}} = R_{\text{О, с}}/R_1 + 1$; если $R_{\text{О, с}} = 0$, то $K_{\text{О, с, н}} = 1$.

$=1$, т. е. схема становится повторителем напряжения.

Входное сопротивление очень велико:

$$R_{вх,о,с} = R_{вх} \frac{K}{K_{о,с}}.$$

Суммирование напряжений

По схеме рис. 15-27 при $U \approx 0$ можно записать уравнения

$$I_a = U_a/R_a; \quad I_b = U_b/R_b; \quad I_c = U_c/R_c \dots$$

$$I_{о,с} = I_a + I_b + I_c + \dots = -U_{вых}/R_{о,с},$$

тогда

$$U_{вых} = -R_{о,с} \left(\frac{U_a}{R_a} + \frac{U_b}{R_b} + \frac{U_c}{R_c} + \dots \right),$$

т. е. выходное напряжение равно взвешенной сумме входных со знаком минус и с весовыми коэффициентами

$$R_{о,с}/R_a, \quad R_{о,с}/R_b, \quad R_{о,с}/R_c \dots$$

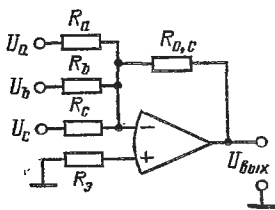


Рис. 15-27. Сумматор на ОУ.

Если входные сопротивления равны, то

$$U_{вых} = -\frac{R_{о,с}}{R} (U_a + U_b + U_c + \dots).$$

Если же $R_{о,с} = R$, то выходное напряжение равно сумме входных со знаком минус:

$$U_{вых} = -(U_a + U_b + U_c + \dots).$$

Для повышения стабильности и устойчивости рекомендуется включать в цепь неинвертирующего входа резистор, сопротивление которого рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_{о,с}} + \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \dots$$

Интегрирование напряжения

Если в схеме рис. 15-26 заменить $R_{о,с}$ конденсатором C , то при $U \approx 0$ можно записать уравнения

$$i_{вх} = u_{вх}/R_i; \quad i_{о,с} = i_{вх};$$

$$u_{вых} = -u_c = -\frac{1}{C} \int i_{о,с} dt =$$

$$= -\frac{1}{R_i C} \int u_{вх} dt.$$

Таким образом, выходное напряжение ОУ пропорционально интегралу входного. Это одно из наиболее распространенных применений ОУ в схемах аналоговых моделей, предназначенных для решения дифференциальных уравнений.

Стабилизация напряжения

ОУ удобны для построения компенсационных стабилизаторов напряжения. Маломощная нагрузка может включаться непосредственно на выход ОУ, при необходимости можно включать нагрузку в цепь

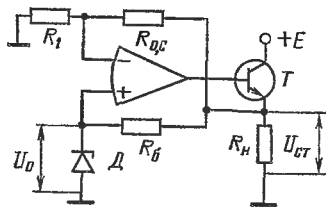


Рис. 15-28. Стабилизатор напряжения на ОУ.

транзистора T (рис. 15-28). Для дальнейшего повышения выходной мощности применяют составные транзисторы. На вход ОУ подается разность опорного напряжения U_0 , снимаемого со стабилитрона D , и части напряжения нагрузки, подаваемой на инвертирующий вход:

$$U_{и} = U_{ст} \frac{R_i}{R_i + R_{о,с}}.$$

Если из-за каких-либо возмущающих факторов напряжение на нагрузке уменьшается, понижается потенциал инвертирующего входа, увеличивается выходное напряжение ОУ, транзистор T открывается, компенсируя возникшее отклонение почти полностью благодаря большому усилению ОУ.

Активные фильтры

При обработке информации, передаваемой электрическими сигналами, часто возникает необходимость в изменении коэффициента передачи составляющих сигнала с разными частотами. Эта задача решается с помощью частотно-зависимых цепей — фильтров. Традиционные фильтры на основе RLC -цепей не всегда эффективны, поэтому большое распространение получили активные фильтры на основе ОУ.

Фильтр нижних частот (рис. 15-29) выполнен на основе ОУ с обратной связью, где $R_{о,с} = 0$. Такой усилитель повторяет на выходе напряжение, поступающее на неинвертирующий (прямой) вход. Для медленно изменяющихся сигналов сопротивления конденсаторов можно считать бесконечно большими, поэтому $K \approx 1$. На высоких частотах сопротивление конденсаторов ста-

новится малым, а фаза выходного напряжения — отстающей по отношению ко входу. В результате модуль коэффициента передачи быстро уменьшается с ростом частоты. Частота сопряжения f_c , на которой начинается спад коэффициента передачи, обычно задается, и по ней можно выбрать элементы схемы:

$$C_1 = \frac{R_1 + R_2}{2\sqrt{2}\pi f_c R_1 R_2};$$

$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{2}\pi f_c (R_1 + R_2)}.$$

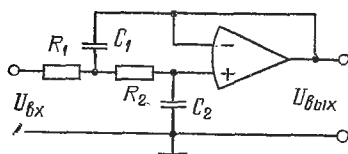


Рис. 15-29. Фильтр нижних частот на ОУ.

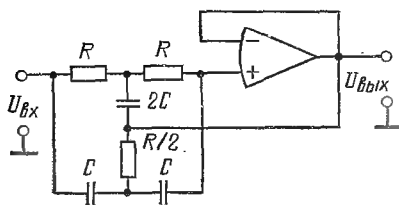


Рис. 15-30. Избирательный (режекторный) фильтр на ОУ с двойным Т-образным мостом.

Если конденсаторы и резисторы в схеме поменять местами, то фильтр станет фильтром высших частот.

Для построения режекторного фильтра, подавляющего коэффициент передачи в окрестности некоторой частоты f_0 , применяют двойные Т-образные фильтры (рис. 15-30). Частота режекции связана с параметрами фильтра соотношением

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Полосу частот, в которой осуществляется ослабление сигнала, можно изменять, передавая на мост не полное напряжение обратной связи, а его часть.

Ограничитель напряжения

Для ограничения выходного напряжения ОУ на заданном уровне применяют цепи с диодами и источниками напряжения или стабилитронами. На рис. 15-31, а положительное напряжение выхода ограничено на уровне $+E$, для ограничения отрицательного напряжения следует использовать цепочки с противоположной полярностью ди-

да и источника. Сопротивление R ограничивает выходной ток ОУ:

$$R \geq \frac{U_{\text{вых max}} - E}{I_{\text{н, доп}}}.$$

Можно избежать увеличения выходного сопротивления, используя схему рис. 15-31, б. Стабилитрон D_1 открывается, когда положительное напряжение выхода достигает суммы

$$U_{\text{вых}} = U_{D1(\text{обр})} + U_{D2(\text{пр})},$$

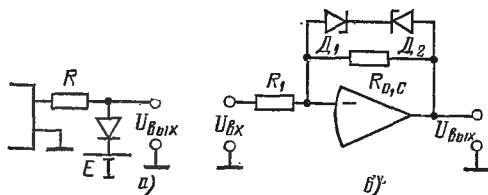


Рис. 15-31. Ограничитель напряжения.

а — с нелинейным элементом в выходной цепи; б — с нелинейным элементом в цепи обратной связи.

при этом усилитель дополнительно нагружается током

$$I = \frac{U_{\text{вых}} + U_{\text{вх}}}{R_1}.$$

Аналогично работает схема, ограничивающая отрицательное напряжение $U_{\text{вых}}$ с помощью D_2 .

Компаратор

ОУ без обратной связи может использоваться в качестве компаратора — схемы сравнения двух напряжений, поданных на инвертирующий и прямой входы. Большой коэффициент усиления обеспечивает достижение выходным напряжением максимального или минимального уровней (либо уровней ограничения) при разности напряжений на входах порядка нескольких милливольт. Для защиты ОУ от перенапряжений на входах следует включать защитную цепочку по типу рис. 15-25. Если потенциал одного из входов равен нулю, схема выполняет функции чувствительного нуля-органа. При подаче на вход знакопеременного напряжения схема формирует на выходе прямоугольный сигнал. Скорость нарастания выходного напряжения ограничивается частотными свойствами ОУ и указывается в паспорте.

Генераторы прямоугольного напряжения

На основе ОУ можно строить генераторы релаксационных колебаний (мультивибраторы). С этой целью выполняют схемы с положительной обратной связью и с времязадающими пассивными цепочками (обычно RC-типа). Распространенная схема генератора прямоугольного напряжения

(рис. 15-32) содержит цепь положительной обратной связи R_1 , R_2 , через которую часть выходного напряжения передается на неинвертирующий вход. Можно убедиться, что при выполнении условия

$$K \frac{R_2}{R_1 + R_2} > 1$$

схема не может устойчиво находиться в линейном режиме, любое ничтожно малое изменение $\Delta U_{\text{вых}}$ передается на прямой вход и приводит к еще большему отклонению выхода, так что окончательно выходное напряжение достигает одного из уровней насыщения: $U_{\text{выкл. min}}$ или $U_{\text{выкл. max}}$. Пусть

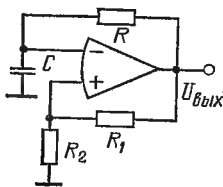


Рис. 15-32. Мультивибратор на ОУ.

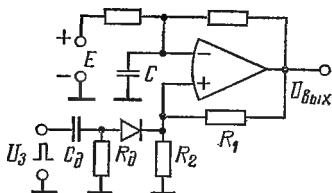


Рис. 15-33. Одновибратор на ОУ.

конденсатор разряжен ($U_{\text{вх. н}} = 0$), а на выходе установилось напряжение $U_{\text{вых. max}}$, тогда на прямом входе напряжение равно:

$$U_{\text{вх. н}} = U_{\text{вых. max}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Конденсатор заряжается с постоянной времени $\tau = RC$, причем напряжение на нем стремится к $U_{\text{вых. max}}$. Когда разность потенциалов входов изменит знак на обратный, происходит быстрое изменение полярности выходного напряжения и конденсатор начнет перезаряжаться. В дальнейшем процессы повторяются. Период работы генератора оценивается приближенной формулой

$$T = 2RC \ln \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Частота генератора, как следует из формулы, определяется времязадающей цепью RC и соотношением плеч делителя R_2/R_1 . Сумма сопротивлений на частоту практически не влияет и может лежать в пределах 10 кОм—1 МОм. Отношение сопротивлений выбирается в пределах 0,05—0,5; ограничения обусловлены ухуд-

шением формы напряжения генератора и снижением стабильности частоты.

На основе мультивибратора по рис. 15-32 можно выполнить одновибратор (защормозенный мультивибратор) (рис. 15-33). С этой целью в схему вводится напряжение смещения E , которое делает устойчивым единственное состояние $U_{\text{вых}} = U_{\text{выкл. min}}$. При подаче положительного импульса запуска $U_{\text{з}}$ через дифференцирующую цепь $C_d R_d$ на напряжение выхода изменяется на $U_{\text{выкл. max}}$. Это новое состояние фиксируется путем подачи с выхода смещения на прямой вход через R_1 , R_2 . Одновременно начинается перезаряд конденсатора C . В момент, когда напряжение на конденсаторе сравняется со смещением на прямом входе, схема возвращается в устойчивое состояние.

Преобразователи напряжения в частоту и длительность импульса

Функциональная схема преобразователя напряжения в частоту или длительность импульсов содержит интегратор I , компаратор K и цепь импульсной обратной связи

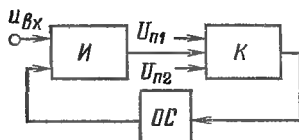


Рис. 15-34. Преобразователь напряжения в частоту.

ОС (рис. 15-34). Преобразователь напряжения в частоту работает следующим образом: интегратор формирует напряжение, скорость изменения которого пропорциональна $U_{\text{вх}}$. В момент, когда достигается пороговый уровень $U_{п1}$, компаратор через цепь ОС выдает одно из следующих воздействий на интегратор:

быстрый разряд накопительного элемента (конденсатора), после чего процесс повторяется;

изменение знака интегрирования, в результате чего напряжение на выходе интегратора начинает изменяться в противоположном направлении, пока не будет достигнут уровень $U_{п2}$. Затем следует очередное изменение знака интегрирования, и процесс повторяется.

Второй способ более сложен в реализации, однако обеспечивает лучшую линейность преобразования напряжения в частоту.

15-7. ЛОГИЧЕСКИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Основные понятия о логических функциях

Логические интегральные микросхемы (ИМС) служат для операций с дискретными сигналами, принимающими два значения,

например высокий и низкий (нулевой) потенциалы. Одному из уровней сигнала приписывается символ 1, другому — 0, причем выбор символа для обозначения высокого потенциала произволен. В распространенной системе ИМС серий 133 и 155 принято обозначать 0 низкий потенциал (от 0 до +0,4 В), а 1 — высокий (от +2,4 до +5 В). Такая система получила название «положительной логики». В системе логических элементов серий 108, 120 напряжение сигнала логической 1 не более —10 В, а 0 — не менее —0,7 В («отрицательная логика»).

Каждая серия логических элементов содержит несколько типов логических схем, реализующих различные логические функции.

Введем основные понятия о логических функциях. Удобно начать рассмотрение с распространенной полной системы логических функций И, ИЛИ, НЕ. Логическая функция И (логическое умножение, конъюнкция) описывается таблицей соответствия (табл. 15-7), которая может быть прочитана

Таблица 15-7

x	y	f
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица 15-8

x	$\bar{y}$	f
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

так: функция принимает значение 1 только в том случае, если и первый, и второй аргументы принимают единичное значение. Аналитическая запись функции И:

$$f = xy \text{ или } f = x \& y.$$

Логическая функция ИЛИ (логическое сложение, дизъюнкция) описывается таблицей соответствия (табл. 15-8), которая может быть прочитана так: функция принимает значение 1 в том случае, если или первый, или второй, или оба сразу аргумента принимают единичные значения. Аналитическая запись функции ИЛИ:

$$f = x + y \text{ или } f = x \vee y.$$

Кроме функций И, ИЛИ введем понятие об отрицании логической величины НЕ. Логическое отрицание (инверсия) записывается в виде $\bar{x}$ и читается «НЕ x ».

Если $x=0$, то $\bar{x}=1$, если $x=1$, то $\bar{x}=0$.

Для интерпретации любых логических функций широко используются карты Карно (рис. 15-35). Карта для двух аргументов содержит 4 клетки, для трех — 8, для m — 2^m клеток. Такое количество клеток достаточно для отображения всех возможных наборов аргументов. Так, в верхней строке карты на рис. 15-35, в имеем пересечение аргумента x с аргументами $y, \bar{y}, z, \bar{z}$, в нижней x с $y, y, z, \bar{z}$.

Все возможные наборы аргументов и их инверсий (обозначаемые в общем виде $\bar{x}yz$) можно свести в табл. 15-9, где представлены двоичные и десятичные числа, соответствующие каждому набору. Положим, что $x=1, \bar{x}=0, y=1, \bar{y}=0, z=1, \bar{z}=0$, тогда набор $x\bar{y}z$ представляется в виде двоичного числа 100, т. е. десятичного 4. Часто вместо записи набора пользуются его десятичным эквивалентом. Каждый набор размещается в одной клетке карты Карно, причем смежные

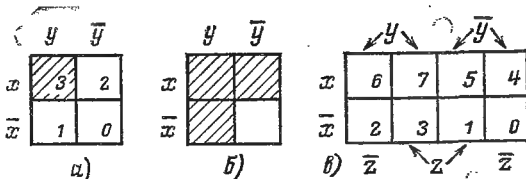


Рис. 15-35. Карты Карно.

a — функция И двух аргументов; b — функция ИЛИ двух аргументов; c — размещение наборов трех аргументов.

Таблица 15-9

Наборы трех аргументов		Десятичные эквиваленты
Набор	Двоичный эквивалент	
$\bar{x} \bar{y} \bar{z}$	0 0 0	0
$\bar{x} \bar{y} z$	0 0 1	1
$\bar{x} y \bar{z}$	0 1 0	2
$\bar{x} y z$	0 1 1	3
$x \bar{y} \bar{z}$	1 0 0	4
$x \bar{y} z$	1 0 1	5
$x y \bar{z}$	1 1 0	6
$x y z$	1 1 1	7

клетки различаются только в одном разряде двоичного числа (0 и 4, 1 и 3, 7 и 5). Такие числа называют соседними. Заметим, что соседними будут также числа в клетках, которые окажутся смежными после свертывания карты Карно в цилиндр (0 и 2, 4 и 6). Подобным образом можно построить карты Карно для четырех, пяти и более аргументов, хотя практически этот способ изображения наборов аргументов трудно использовать при числе аргументов больше семи-восьми.

Соотношения алгебры логики

Для операции над логическими функциями следует знать основные соотношения, истинность которых можно проверить на всех наборах прямой подстановкой значений аргументов 0 или 1:

$$0 \vee x = x; 0 \cdot x = 0; 1 \vee x = 1;$$

$$1 \cdot x = x; x \vee x = x; x x = x; \bar{\bar{x}} = x;$$

$$\begin{aligned}x \vee \bar{x} &= 1; \quad \bar{x}x = 0; \quad x \vee y = y \vee x; \\xy &= yx; \quad x \vee (y \vee z) = (x \vee y) \vee z; \\x(yz) &= (xy)z; \quad x(y \vee z) = xy \vee xz; \\ \overline{x \vee y} &= \bar{x}\bar{y}; \quad \overline{\bar{x} \vee \bar{y}} = xy.\end{aligned}$$

На основании приведенных тождеств можно производить минимизацию логических выражений.

Примеры:

$$\begin{aligned}1. \ a \vee \bar{a}b &= a(b \vee \bar{b}) \vee \bar{a}b = ab \vee a\bar{b} \vee \bar{a}b = \\&= ab \vee a\bar{b} \vee ab \vee \bar{a}b = a(b \vee \bar{b}) \vee b(a \vee \bar{a}) = \\&= a \vee b. \\2. \ (x \vee y)(y \vee z) &= xy \vee xz \vee y \vee yz = \\&= y(x \vee 1 \vee z) \vee xz = y \vee xz.\end{aligned}$$

Наборы аргументов, сведенные в таблицу или представленные в виде карты Карно, дают возможность определять различные логические функции. Так, на рис. 15-35, а показана функция И, принимающая значение единицы на наборе 3 (защтрихован) и 0 — на всех остальных наборах, на рис. 15-35, б показана функция ИЛИ.

На четырех наборах двух аргументов x и y можно определить $2^4=16$ различных функций (табл. 15-10). Каждая функция f записана в одной из строк таблицы, пронумерованных числами от 0 до 15. В верхних двух строках записаны все возможные наборы двух переменных x и y : 00, 01, 10, 11. Каждому набору может соответствовать одно из двух значений функции $f=0$ или $f=1$. В таблице записаны все возможные комбинации значений функции на всех четырех

Таблица 15-10

Функции двух аргументов

x y	0 0 1 1 0 1 0 1	f
0	0 0 0 0	0
1	0 0 0 1	$xy = x \vee \bar{y}$
2	0 0 1 0	$\bar{x}y = \bar{x} \vee y$
3	0 0 1 1	x
4	0 1 0 1	$\bar{x}y = x \vee \bar{y}$
5	0 1 0 1	y
6	0 1 1 0	$\bar{x}y \vee x\bar{y}$
7	0 1 1 1	$x \vee y$
8	1 0 0 0	$x \vee y = \bar{x}\bar{y}$
9	1 0 0 1	$xy \vee \bar{x}\bar{y}$
10	1 0 1 0	$\bar{y}$
11	1 0 1 1	$x \vee \bar{y}$
12	1 1 0 0	$\bar{x}$
13	1 1 0 1	$\bar{x} \vee y$
14	1 1 1 0	$\bar{x}y = \bar{x} \vee \bar{y}$
15	1 1 1 1	1

наборах в виде последовательности четырехразрядных двоичных чисел от 0000 до 1111. В правом столбце даны аналитические значения функции f .

Из этих функций две тривиальны — это константы $f_0=0$ и $f_{15}=1$, четыре функции зависят только от одного аргумента ($f_3=x$, $f_5=y$, $f_{10}=\bar{y}$, $f_{12}=\bar{x}$), а из оставшихся десяти наиболее употребительны:

$$\begin{aligned}f_1 &= xy \text{ — конъюнкция (И);} \\f_{14} &= \bar{x}\bar{y} \text{ — отрицание конъюнкции (НЕ-И);} \\f_7 &= x \vee y \text{ — дизъюнкция (ИЛИ);} \\f_8 &= \bar{x} \vee \bar{y} \text{ — отрицание дизъюнкции (НЕ-ИЛИ);} \\f_6 &= \bar{x}y \vee x\bar{y} \text{ — неравнозначность;} \\f_9 &= xy \vee x\bar{y} \text{ — равнозначность (сумма по модулю 2);}\end{aligned}$$

$$f_2 = \bar{x}y \text{ — запрет } x \text{ (функция повторяет значение } x, \text{ если отсутствует сигнал запрета } y);$$

$$f_4 = \bar{x}y \text{ — запрет } y.$$

С увеличением числа аргументов m множество различных функций быстро растет (2^{2^m}). Однако их удается выразить через комбинацию тех же зависимостей И, ИЛИ, НЕ, как это сделано в табл. 15-10.

Минимизация логических выражений

Логические функции можно задавать с помощью таблиц соответствия или карт Карно. Они служат удобным средством для формального описания логических задач, выявления любой неоднозначности или неполноты в постановке. Заданную таким образом логическую функцию можно минимизировать, т. е. свести к минимуму число букв в аналитическом выражении формулы, а затем построить принципиальную схему с использованием типовых логических элементов.

Таким образом, операции над логическими функциями являются составной частью синтеза логических схем.

Примеры описания и минимизации логических выражений

1. Построить схему, выполняющую функцию мажорирования «2 из 3». Схема имеет три входа и один выход; выход повторяет логический сигнал, который присутствует на большинстве входов (2 или 3). Табличная запись логической зависимости (табл. 15-11) делит все наборы аргументов на две группы: наборы 0, 1, 2, 4, на которых функция принимает нулевое значение, и наборы 3, 5, 6, 7, где функция равна 1. Эта функция изображена на карте Карно (рис. 15-36).

Аналитически функцию можно описать в дизъюнктивной или конъюнктивной канонических формах (ДКФ или ККФ). В ДКФ функцию записывают как логическую сумму конъюнкций всех аргументов

Таблица 15-11

№	a	b	c	f
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	1
4	1	0	0	0
5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	1

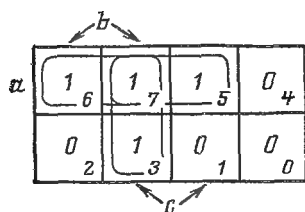


Рис. 15-36. Минимизация мажоритарной функции «2 из 3».

тех наборов, на которых $f=1$. Если аргумент принимает значение 1 в данном наборе, его записывают без знака инверсии, в противном случае — с инверсией:

$$f_1 = \bar{a}bc \vee a\bar{b}c \vee ab\bar{c} \vee abc.$$

Полученное выражение можно минимизировать:

$$\begin{aligned} f_1 &= \bar{a}bc \vee abc \vee a\bar{b}c \vee abc \vee ab\bar{c} \vee abc = \\ &= bc(a \vee \bar{a}) \vee ac(b \vee \bar{b}) \vee ab(c \vee \bar{c}) = \\ &= bc \vee ac \vee ab. \end{aligned}$$

В ККФ функцию записывают как логическое произведение дизъюнкций всех аргументов тех наборов, на которых $f=0$. Если аргумент принимает значение 0 в данном наборе, его записывают без знака инверсии, в противном случае — с инверсией:

$$f_1 = (a \vee b \vee c)(a \vee b \vee \bar{c})(a \vee \bar{b} \vee c) \times (\bar{a} \vee b \vee c).$$

Полученное выражение также можно минимизировать:

$$\begin{aligned} f_1 &= (a \vee b \vee c)(a \vee b \vee \bar{c})(a \vee \bar{b} \vee c) \times \\ &\times (a \vee \bar{b} \vee c)(a \vee b \vee c)(a \vee b \vee \bar{c}) = \\ &= (a \vee b)(a \vee c)(b \vee c) = ab \vee bc \vee ac. \end{aligned}$$

Минимизацию удобно выполнять с помощью карт Карно, где эта операция становится предельно наглядной.

Логическая функция, которая принимает значение 0 на одной группе наборов аргументов и 1 на другой группе, записывается в соответствующих клетках карты Карно. Соседние клетки карты, на которых функция принимает одно значение, например 1, можно объединять («склеивать») попарно

Таблица 15-12

№	a	b	c	d	f
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	X
2	0	0	1	0	X
3	0	0	1	1	X
4	0	1	0	0	1
5	0	1	0	1	X
6	0	1	1	0	X
7	0	1	1	1	X
8	1	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0
10	1	0	1	0	0
11	1	0	1	1	0
12	1	1	0	0	0
13	1	1	0	1	0
14	1	1	1	0	0
15	1	1	1	1	1

(при этом выпадает один аргумент, принимающий разные значения в склеиваемых клетках) или по 4, 8, 16. При этом склеиваемые клетки должны образовывать полную строку, полный столбец, квадрат или прямоугольник. Для функции f_1 на рис. 15-36 удается склеить пару 6 и 7, следовательно, значение функции на наборах 6 и 7 можно записать как ab (выпадает c), при склеивании пары 7 и 5 значение функции запишется как ac (выпадает b), при склеивании 3 и 7 значение функции запишется как bc (выпадает a); логическая сумма (дизъюнкция) всех наборов, на которых функция принимает значение 1, дает, как и ранее:

$$f_1 = ab \vee ac \vee bc.$$

2. Пусть логическая зависимость формулируется следующим образом: генератор можно включать в систему методом точной синхронизации, т. е. при наличии возбуждения, равенстве частот и совпадении фаз, а также методом самосинхронизации, т. е. при отсутствии возбуждения и при равенстве частот. Условие, при котором допускается включение генератора в сеть, можно описать логической зависимостью.

Пусть сигнал наличия возбуждения $a=1$, сигнал равенства частот $b=1$, сигнал совпадения фаз $c=1$, сигнал совпадения напряжений $d=1$. Все возможные наборы аргументов сведен в табл. 15-12. Их можно разделить на три группы:

1) наборы аргументов, на которых функция f_2 принимает значение 1, т. е. включение разрешается. Это наборы 4 и 15, соответствующие самосинхронизации и точной синхронизации;

2) наборы аргументов, на которых $f_2=0$, т. е. включение не разрешается. Это наборы 0, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14;

3) наборы аргументов, которые внутренне противоречивы, а потому никогда не могут быть реализованы: 1, 2, 3, 5, 6, 7. Мож-

но считать, что функция на этих наборах не определена.

Запишем функцию в ДКФ:

$$f_2 = \bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d} \vee abcd.$$

Можно убедиться, что $f_2=1$, если реализуются наборы 4 или 15 аргументов ($a=0, b=1, c=d=0$ или $a=b=c=d=1$).

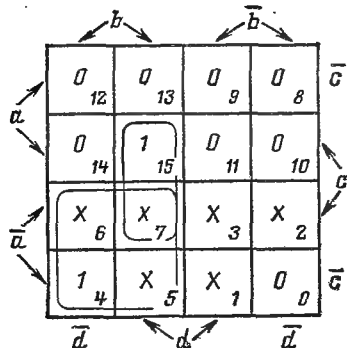


Рис. 15-37. Минимизация неполностью определенной функции четырех аргументов.

Наличие группы наборов, на которых функция не определена, дает дополнительную возможность минимизации. Разместим значения функции в клетках карты Карно четырех аргументов (рис. 15-37).

Доопределим наборы 5, 6, 7 до единицы, а 1, 2 и 3 — до нуля, т.е. припишем соответствующим наборам значения 1 или 0 для получения наиболее крупных групп склеива-

емых клеток. Тогда оказывается возможным склеить четыре клетки 4, 5, 6, 7 и пару клеток 7 и 15. Полученный результат имеет четкую физическую трактовку, вполне отвечающую постановке задачи:

$$f_2 = \bar{a}b \vee bcd.$$

Аппаратурная реализация логических зависимостей

Логические зависимости, полученные в результате описания и минимизации, можно реализовать, используя типовые элементы. В каждой серии логических интегральных микросхем содержится функционально полный набор элементов. Так, если в серии содержатся элементы И, ИЛИ, НЕ, то выражения, полученные в примерах 1 и 2, реализуются схемами рис. 15-38, а и 15-39, а. Функционально полный набор представляет единственный тип элемента И—НЕ, а также единственный тип ИЛИ—НЕ.

Двухвходовый элемент И—НЕ реализует функцию $f = xy = x \vee y$.

Если на оба входа подан один и тот же сигнал либо сигнал подан на один вход, а на другой — константа 1, то элемент реализует функцию НЕ: $f = \bar{x} = x \cdot 1 = \bar{x}$.

Элемент ИЛИ—НЕ реализует функцию $f = x \vee y = \bar{x}y$.

Если на оба входа подан один и тот же сигнал либо сигнал подан на один вход, а на другой — константа 0, то элемент реализует функцию НЕ: $f = \bar{x} = x \vee 0 = \bar{x}$.

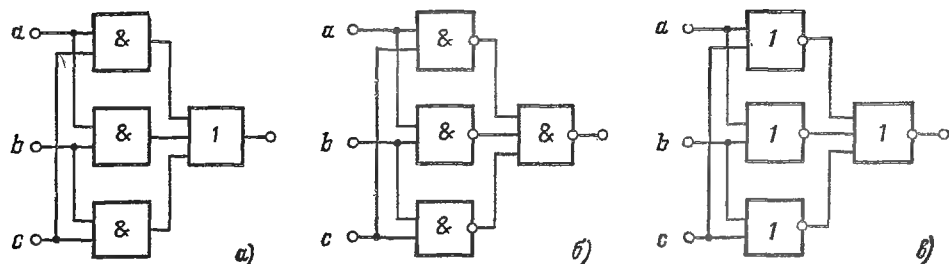


Рис. 15-38. Схема мажоритарной логики.

а — на элементах И, ИЛИ; б — на элементах И—НЕ; в — на элементах ИЛИ—НЕ.

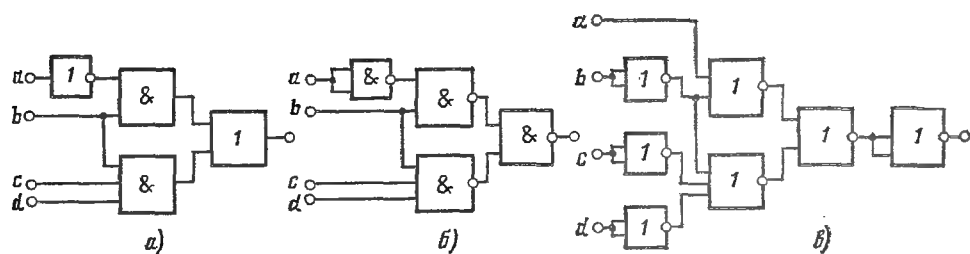


Рис. 15-39. Схема пуска генератора.

а — на элементах И, ИЛИ; б — на элементах И—НЕ; в — на элементах ИЛИ—НЕ.

Реализация функций И и ИЛИ на элементах И—НЕ, ИЛИ—НЕ показана на рис. 15-40, а, з. Возможность реализовать функции И, ИЛИ, НЕ делает набор полным. Это создает определенные удобства при проектировании, поскольку номенклатура элементов сводится к минимуму. Однако для реализации функциональных зависимостей на

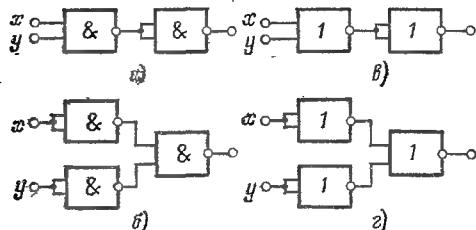


Рис. 15-40. Реализация основных логических функций на элементах И—НЕ, ИЛИ—НЕ.

а, з — И; в, д — ИЛИ.

базе И—НЕ либо ИЛИ—НЕ необходимо записать выражения в форме, которая соответствует выбранной базе. Для базы И—НЕ выражения примеров 1 и 2 приведем к виду (рис. 15-38, в, 15-39, б)

$$f_1 = ab \vee bc \vee ac = \overline{ab \vee bc \vee ac} = \overline{ab \vee bc} \wedge \overline{ac};$$

$$f_2 = \overline{ab} \vee bcd = \overline{ab \cdot bcd}.$$

Для базы ИЛИ—НЕ соответственно (рис. 15-38, в и 15-39, в)

$$f_1 = (a \vee b)(b \vee c)(a \vee c) = \overline{a \vee b \vee b \vee c \vee a \vee c};$$

$$f_2 = \overline{ab} \vee bcd = \overline{a \vee \overline{b} \vee \overline{b} \vee c \vee \overline{c} \vee d}.$$

Минимизация аппаратных затрат практически не формализуется т.е. ее не удастся свести к последовательности применяемых правил, однако для сравнения различных решений существуют методы, сводящиеся к оценке общего числа входов микросхем.

Построение логической схемы сводится к последовательности действий:

- 1) составить таблицу соответствия;
- 2) описать логическую функцию на карте Карно или аналитически;
- 3) минимизировать логическое выражение, доопределив неполностью определенную функцию;
- 4) записать логическое выражение в форме, соответствующей выбранному элементному базису;
- 5) составить принципиальную схему.

Дешифраторы

Распространенный класс логических схем — дешифраторы. Дешифратор имеет m независимых входов и 2^m выходов. На

входы подаются всевозможные наборы аргументов, каждому набору соответствуют сигналы 0 (или 1) на одном выходе и 1 (или 0) — на остальных. Пример дешифратора на три независимых входа x, y, z приведен на рис. 15-41 (инверсные входные сигналы $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ легко получить с помощью схем НЕ). Набору 000 соответствует сигнал 0 на выхо-

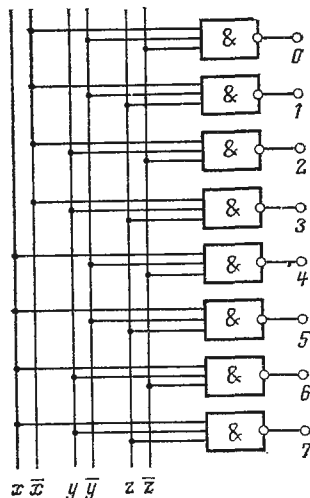


Рис. 15-41. Дешифратор на элементах И—НЕ.

де 0, на остальных выходах имеем логическую 1; набору 101=5 соответствует сигнал 0 на выходе 5 и т.д.

Триггеры и триггерные устройства

Рассмотренные выше логические схемы называют комбинационными, поскольку выходной сигнал однозначно определяется набором (комбинацией) аргументов на входах независимо от того, какие значения принимали аргументы в предшествовавшие моменты времени. Между тем на практике часто возникает необходимость поставить логическую величину на выходе схемы в некоторую зависимость от предыстории.

Покажем два примера задач такого рода.

1. Логический сигнал на выходе схемы должен принять значение 1, если входной сигнал y поступил не позже чем через 1 с после поступления сигнала x . Здесь накладываются ограничения на протяженность временных интервалов. Построение таких схем требует применения задержек, которые в зависимости от значения сигнала n требуемой точности выполняются либо на операционных усилителях, либо на логических элементах.

2. Логический сигнал на выходе схемы должен принять значение 1, если сигналы

x, y, z поступают на вход схемы в заданной последовательности. Здесь накладываются ограничения на последовательность изменения состояний, для чего их приходится запоминать. Число предшествующих состояний, которое необходимо запомнить для нормального функционирования схемы, определяет требуемую глубину памяти.

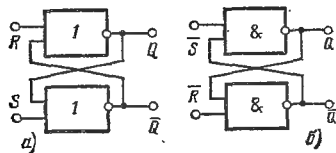


Рис. 15-42. Триггер RS.

а — на элементах ИЛИ-НЕ; б — на элементах И-НЕ.

Дальнейшее рассмотрение будет посвящено только схемам с памятью.

Простейшим элементом памяти является RS-триггер (рис. 15-42) (от англ. слов set — установка, reset — сброс). Он представляет собой схему с обратной связью, выполненную на элементах И-НЕ либо ИЛИ-НЕ. При системе обозначений рис. 15-42 функционирование обеих схем описывается одинаково.

Q_{t+1} — состояние выхода после поступления указанного набора входных сигналов. Из табл. 15-13 следует, что при $R=S=0$ схема сохраняет свое предшествующее состояние, комбинации сигналов 01 и 10 устанавливают выход в одно из состояний: 1 или 0, и это состояние хранится (запоминается) после перехода к входной комбинации 00. Комбинация 11 считается запрещенной, поскольку действие обратных связей при этом нарушается и последующее состояние схемы не определено. Заметим, что для схемы рис. 15-42, б все входные сигналы в таблице следует инвертировать.

Таблица 15-13

R	S	Q_{t+1}
0	0	Q_t
0	1	1
1	0	0
1	1	—

Триггеры описываются также аналитическими зависимостями и функциями возбуждения (табл. 15-14).

Функция возбуждения показывает, какая совокупность сигналов на входах обеспечивает переход из состояния Q_t в состояние Q_{t+1} . Буквой b обозначено безразличное состояние входа.

Различают асинхронные и синхронные (тактируемые) триггеры. Первые изменяют свое состояние только под действием входных сигналов. Тактируемые триггеры имеют 32*

дополнительный вход C (от английского clock — часы), сигналы которого разрешают изменение состояния. Схемная реализация и диаграммы работы тактируемого RS-триггера приведены на рис. 15-43.

В интегральном исполнении выпускаются тактируемые триггеры D- и JK-типов. Их функционирование описывается таблицами соответствия, логическими формулами и функциями возбуждения (табл. 15-15—15-18).

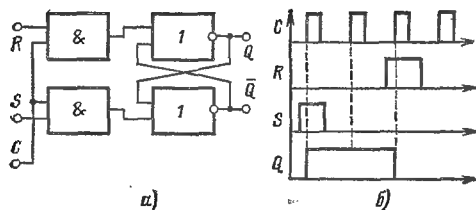


Рис. 15-43. Синхронный RS-триггер.

а — схема; б — диаграммы работы.

Таблица 15-14

Q_t	Q_{t+1}	R	S
0	0	b	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	b

$$Q_{t+1} = \bar{R}(SVQ_t)$$

Таблица 15-15

D_t	Q_{t+1}
0	0
1	1

$$Q_{t+1} = CD_t$$

Таблица 15-16

J	K	Q_{t+1}
0	0	Q_t
0	1	1
1	0	0
1	1	$\bar{Q}_t$

$$Q_{t+1} = K\bar{Q}_t \vee \bar{J}Q_t$$

Таблица 15-17

Q_t	Q_{t+1}	D_t
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Таблица 15-18

Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	$\bar{b}$	0
0	1	$\bar{b}$	1
1	0	1	$\bar{b}$
1	1	0	$\bar{b}$

Счетчики

Счетчиками называют схемы, которые могут находиться в N различных состояниях и переходят из одного состояния в другое в определенной последовательности

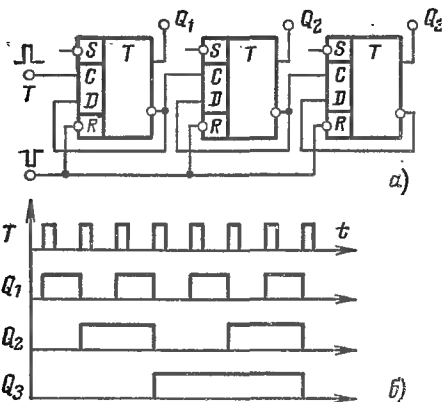


Рис. 15-44. Двоичный счетчик на сложение. а — схема; б — диаграмма состояний.

под действием входного сигнала. Простейший счетчик на сложение (рис. 15-44) может быть построен на триггерах D - или JK -типов. Входной сигнал T поступает на вход C первого триггера. Если соединить инверсный выход с входом D , то в соответствии с уравнением

$$Q_{t+1} = CD_t = CQ_t$$

с приходом каждого импульса на вход C состояние выхода будет изменяться на противоположное. Момент изменения состояния совпадает с положительным перепадом сигнала C . Соединив инверсный выход первого триггера со входом второго, получим, что Q_2 будет изменяться при положительных перепадах $\bar{Q}_1$, которые совпадают во времени с отрицательными перепадами Q_1 . Для установки всех триггеров в исходное (нулевое) состояние используют общий сигнал, подаваемый на все установочные входы R . После прихода очередного импульса на выходах Q_3, Q_2, Q_1 будем получать последовательность двоичных чисел 001, 010, 011..., соответствующих числу поступивших импульсов. Число состояний

двоичного счетчика

$$N = 2^m,$$

где m — число триггеров.

Аналогично выполняется счетчик на JK -триггерах. Если вход следующего триггера будет соединен не с инверсным, а с прямым выходом предыдущего, то получим счетчик на вычитание, число в котором бу-

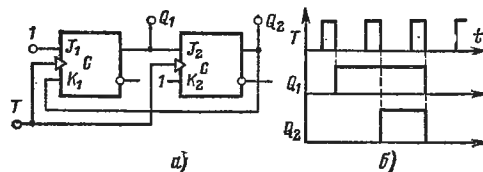


Рис. 15-45. Счетчик на 3.

дет уменьшаться на единицу с приходом каждого счетного импульса. Можно выполнить управляемую систему связей между триггерами, которая позволяет изменять режим работы (сложение — вычитание). Такие счетчики называют реверсивными. Число состояний счетчика можно уменьшать, запрещая некоторые (избыточные) состояния. Так, для построения счетчика с тремя состояниями ($N=3$) необходимо запретить одно избыточное состояние в схеме на двух триггерах (рис. 15-45, а). Если в исходном состоянии $Q_1=Q_2=0$, то первый импульс изменит состояние первого триггера, поскольку $K_1=Q_2=0$. Второй импульс, не изменяя состояния первого триггера, у которого по-прежнему $K_1=0$, установит $Q_2=1$, поскольку $J_2=K_2=1$. Наконец, третий импульс возвратит оба триггера в исходное состояние (рис. 15-45, б). Опрокидывание триггеров происходит в момент отрицательного перепада сигнала C . Для получения $N=10$ (десятичный счетчик) запрещают шесть избыточных состояний в схеме на четырех триггерах. Четырехразрядные счетчики и счетчики на 10 выпускаются в настоящее время в интегральном исполнении как одна микросхема с повышенной степенью интеграции (К1ИЕ551, 2ИЕ301, 2ИЕ302, 2ИЕ303, 2ИЕ311).

Регистры

Регистром называют устройство для приема, хранения (запоминания), поразрядного логического сложения и сдвига информации. Входную информацию можно вводить в регистр одновременно во все разряды (параллельные регистры) или последовательно. Функция приема и хранения параллельной информации поясняется рис. 15-46. Входной набор (входное слово x_{iuz} поступает на входы верхних схем И, а инвертированное слово — на входы нижних схем И. Таким образом, на схемах И, связанных с любым из триггеров, всегда будут взаимно инверсные сигналы. В момент поступления

сигнала C осуществляется установка триггеров в состояния, обусловленные сигналами на R - и S -входах.

Операция сдвига служит основой умножения двоичных чисел; например, сдвинув число 101 влево на один разряд, увеличим его вдвое (1010). Сдвиговый регистр с последовательным вводом информации

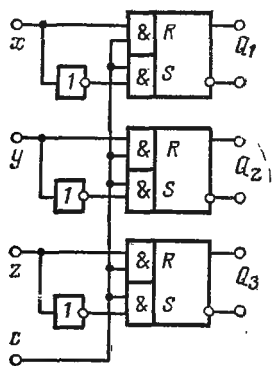


Рис. 15-46. Регистр-память.

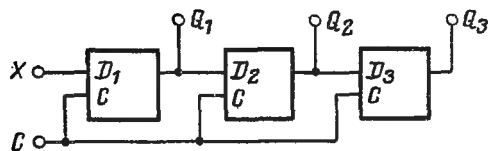


Рис. 15-47. Регистр сдвига.

показан на рис. 15-47. В момент поступления тактирующего импульса C в первый триггер запишется сигнал x , который действовал на входе D_1 . Второй импульс переписит этот сигнал во второй триггер и т. д. Таким образом, всегда

$$Q_{i+1,t+1} = Q_{i,t},$$

где $Q_{i,t}$ — выход i -го триггера на такте t .

Путем введения дополнительных управляемых связей между триггерами получают возможность сдвига записанного слова как вправо, так и влево. Некоторые виды регистров также выпускаются в виде интегральных схем с повышенной степенью интеграции (К1ИР201, К1ИР203, К1ИР205, К1ИР207, К1ИР204, 2ИР301, 2ИР302, 2ИР401, 2ИР402).

Распределители

Распределитель представляет собой разновидность схемы с памятью, которая распределяет входные сигналы по нескольким каналам на выходе. Очевидно, число независимых каналов не может быть больше числа состояний схемы. Простейший рас-

пределитель на три канала имеет три состояния, в каждом из которых на одном из выходов имеется логическая единица, а на остальных выходах — нуль. Последовательность состояний распределителя можно записать кодовыми словами: 100, 010, 001... Можно выполнить распределитель с иной продолжительностью действия логического сигнала на выходах. Например, в схеме с состояниями выхода 011, 101, 110 логическая единица присутствует на каждом из выходов в течение двух тактов.

В схемном отношении распределитель не является специфическим классом схем; функцию распределения сигналов по нескольким каналам на выходе можно реализовать на основе известных схем счетчиков и регистров.

Число состояний счетчика или регистра определяется необходимым числом независимых выходных каналов. Выходы счетчика (регистра) связаны с выходными каналами распределителя через дешифратор. В счетчике $N=3$ (рис. 15-45) состояния чередуются в последовательности: 00, 10, 11..., состояние 01 запрещено. Дешифратор с выходами a, b, c должен реализовать функции: $a = \bar{Q}_1$, $b = Q_1 \bar{Q}_2$, $c = Q_2$.

Синтез схем с памятью

Каждая схема с памятью представляет собой автомат, который характеризуется наборами входных и выходных сигналов и набором внутренних состояний.

Наиболее простой из автоматов — двоичный счетчик — имеет единственный вход, регистр по рис. 15-46 имеет три входа и допускает $2^3=8$ комбинаций входных сигналов. Для того чтобы синтезировать схему, необходимо выполнить определенную последовательность как формализуемых, так и неформализуемых операций. Рассмотрим их на примере синтеза схемы, которая при подаче на ее вход импульсов устанавливалась бы последовательно в шести циклически повторяющихся состояниях: 000—001—011—111—110—100—000. Выберем в качестве элементарных автоматов для синтеза этой схемы D-триггеры, функция возбуждения которых приведена выше. Переход схемы в каждое последующее состояние z_{t+1} обусловлен входным сигналом x и предыдущим состоянием z_t :

$$z_{t+1} = f(x, z_t).$$

Поскольку число состояний известно, можно определить минимально необходимое количество триггеров как ближайшее большее целое от логарифма N по основанию 2:

$$m = \lceil \log_2 N \rceil;$$

в нашем случае $m=3$.

Составим кодированную таблицу переходов (табл. 15-19), которая будет содержать шесть строк (по числу состояний автомата), а в столбцах запишем состояния

Таблица 15-19

№	t			$t+1$			D_1	D_2	D_3
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3			
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1
3	0	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	0	0	1	1	0
5	1	1	0	1	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0

триггеров в двух смежных тактах: t и $t+1$. Переход из состояния Q_i в Q_{i+1} происходит под действием входного сигнала. В правых

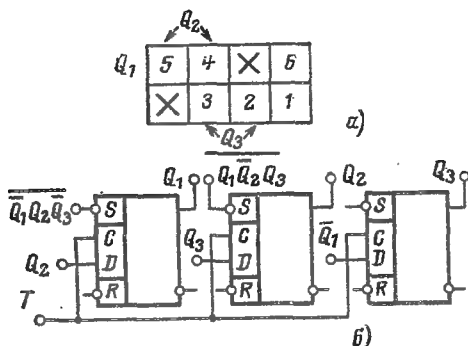


Рис. 15-48. Синтез автомата.

a — последовательность состояний; b — принципиальная схема.

столбцах записываются те значения входных сигналов для D-триггеров, которые осуществляют этот переход. Так, в первой строке записано, что под действием тактового сигнала схема должна перейти из состояния 000 в состояние 001, т. е. первый и второй триггеры должны «перейти из состояния 0 в состояние 0». На основании табл. 15-17 записывается необходимый для этого перехода входной сигнал $D_1=D_2=0$. Триггер 3 должен сменить состояние с 0 на 1. Для этого вход $D_3=1$. Объединяя функции возбуждения по столбцам, получаем, что на вход D_1 должна быть подана логическая единица при наборах 011, 111 и 110 в такте t . Записывая эту функцию в канонической дизъюнктивной форме, получаем:

$$D_1 = \bar{Q}_1 Q_2 Q_3 \vee Q_1 Q_2 Q_3 \vee Q_1 Q_2 \bar{Q}_3 = \\ = Q_1 Q_2 \vee Q_2 Q_3.$$

Аналогично

$$D_2 = \bar{Q}_1 Q_3 \vee Q_2 Q_3;$$

$$D_3 = \bar{Q}_1 \bar{Q}_2 \vee \bar{Q}_1 Q_3.$$

Полученные выражения можно упростить, если учесть, что два состояния (010 и 101) отсутствуют в таблице, тогда из карты Карно (рис. 15-48, a) следует, что каждую тройку состояний можно объединить с одним из отсутствующих:

$$D_1 = Q_2; D_2 = Q_3; D_3 = \bar{Q}_1.$$

Наконец, необходимо позаботиться о том, чтобы при появлении одной из запрещенных комбинаций (010 или 101) схема автоматическим переходила в одно из рабочих состояний. Если на это рабочее состояние не накладывается никаких ограничений, то достаточно изменить состояние любого из трех триггеров. Например, на рис. 15-48, b на вход $\bar{S}$ первого триггера подается сигнал, который переводит схему из состояния 010 в состояние 110, а состояние 101 также сделано неустойчивым: благодаря воздействию на установочный вход второго триггера получаем переход 101—111. Таким образом, можно сформулировать последовательность операций синтеза несложных автоматов:

- 1) определение множества состояний автомата;
- 2) определение минимального числа би-стабильных ячеек (триггеров);
- 3) кодирование состояний автомата, т. е. установление однозначного соответствия между каждым состоянием автомата и набором состояний триггеров;
- 4) составление кодированной таблицы переходов;
- 5) описание функций возбуждений триггеров логическими уравнениями и их минимизация с учетом избыточных наборов;
- 6) исключение запрещенных состояний;
- 7) составление принципиальной схемы.

Интегральные микросхемы с большой степенью интеграции и микропроцессоры

Надежность узлов, выполненных на микросхемах, во многом определяется числом паяных соединений. Поэтому естественным желанием потребителей было получить такую интегральную схему, которая одна полностью выполняла бы поставленную задачу. В принципе такой путь возможен, но экономически он становится рентабельным лишь при больших партиях таких специализированных ИМС. Развитие микроэлектроники выявило следующие возможные пути повышения степени интеграции:

- 1) выполнение интегральных схем общего применения со средней степенью интеграции. К таким схемам относятся уже упоминавшиеся счетчики, регистры, а также комбинационные схемы: дешифраторы, сумматоры, мультиплексоры;
- 2) выполнение специализированных схем частного применения со средней степенью интеграции на основе гибридных ИМС;
- 3) выполнение интегральных схем с большой степенью интеграции, выполняющих функции процессоров — микропроцессоров.

Разработка микропроцессоров стала возможной, когда появились монолитные ИМС со степенью интеграции до нескольких тысяч и десятков тысяч компонентов в одном кристалле. На таких ИМС выполняются узлы, составляющие основу ЭВМ: арифметико-логическое устройство, устройство уп-

равления, устройство памяти и ввода-вывода информации. Универсальность микропроцессоров обусловлена возможностью выполнения самых различных программ, закладываемых в памяти. Таким образом, вместо аппаратного пути решения разнообразных задач, как это делалось на основе ИМС общего применения путем построения специально разработанных схем, здесь реализован программный путь. Микро-ЭВМ может выполнять любые арифметические и логические операции, благодаря чему они применяются как для управления технологическими процессами, так и для решения вычислительных задач.

Список литературы

15-1. Нефедов А. В., Гордеева В. И. Отечественные полупроводниковые приборы и их зарубежные аналоги. — М.: Энергия, 1978. — 208.

15-2. Агахания Т. М. Основы транзисторной электроники. — М.: Энергия, 1974. — 286 с.

15-3. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. — М.: Энергия, 1977. — 672 с.

15-4. Транзисторы и полупроводниковые диоды/Под ред. Н. Ф. Николаевского. — М.: Советское радио, 1963. — 647 с.

15-5. Виноградов Ю. В. Основы электронной и полупроводниковой техники. — М.: Энергия, 1972. — 536 с.

15-6. ГОСТ 15133-77. Приборы полупроводниковые. Термины и определения.

15-7. ГОСТ 20003-74. Транзисторы биполярные. Электрические параметры. Термины, определения и буквенные обозначения.

15-8. ГОСТ 19095-73. Транзисторы полевые. Электрические параметры. Термины, определения и буквенные обозначения.

15-9. ГОСТ 20332-74. Тиристоры. Электрические параметры. Термины, определения и буквенные обозначения.

15-10. СТ СЭВ 1125-78. Приборы полупроводниковые силовые. Термины, определения и буквенные обозначения.

15-11. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств/Под ред. В. Н. Дулина, М. С. Жука. — М.: Энергия, 1978. — 576 с.

15-12. Справочник по интегральным микросхемам/Под ред. Б. В. Тарабрина. — М.: Энергия, 1977. — 584 с.

15-13. Шалимова К. В. Физика полупроводников. — М.: Энергия, 1976. — 416 с.

15-14. ГОСТ 19480-74. Микросхемы интегральные. Электрические параметры. Термины, определения и буквенные обозначения.

15-15. ГОСТ 18683-73. Микросхемы интегральные логические. Методы измерения электрических параметров.

15-16. ГОСТ 19799-74. Микросхемы интегральные аналоговые. Методы измерения электрических параметров и определения характеристик.

15-17. Гутников В. С. Применение операционных усилителей в измерительной технике. — Л.: Энергия, 1975. — 120 с.

15-18. ГОСТ 18421-73. Усилители операционные. Термины и определения.

15-19. Рутковский Дж. Интегральные операционные усилители. Справочное руководство. — М.: Мир, 1978. — 324 с.

15-20. Букреев И. Н., Мансуров Б. М., Горячев В. И. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. — М.: Советское радио, 1975. — 368 с.

15-21. Будинский Я. Логические цепи в цифровой технике. — М.: Связь, 1977. — 392 с.

15-22. Вальков В. М., Ильющенко Ю. М. Цифровые интегральные схемы, микропроцессоры и микро-ЭВМ. — М.: Советское радио, 1977. — 104 с.

А

Абсорбции ток 81
 Авогадро число 19
 Автотрансформатор поворотный 45
 Автотрансформаторы 47
 Автоэлектронная эмиссия 91
 Аккумуляторы 54
 Активная мощность 134
 Активной мощности измерение 196
 Активные двухполюсники 113, 124
 — составляющие напряжения и тока 109
 Акустических величин единицы 13
 Акцепторы 72, 318, 321
 Алгебра логики 502
 Альни, альнико 347
 Альсифер 341
 Алюминиевая проволока 384
 Алюминиевые обмоточные провода 472
 — провода 387
 — сплавы 365, 386, 387
 Алюминий 363, 376
 Амортизационные отчисления 256
 Аморфные диэлектрики 82
 Ампер 16, 17
 Амперметр 51, 197, 199
 Амплитуда 107
 Амплитудно-фазовая характеристика 126
 Амплитудно-частотная характеристика 126, 148
 Амплитуды коэффициент 134
 Аналогия электростатическая 171
 Аналоговые вычислительные машины 68
 — измерительные приборы 194
 Ангстрем 11
 Анизотропия 327, 328
 Аппаратов заземление 268
 — степени защиты 237
 Аппараты. Выбор исполнения для пожароопасных помещений 284
 — до 1000 В. Требования безопасности 267
 Арматура кабельная 445
 — — Требования безопасности 268
 Асбестостолит 301, 302, 303
 Асинхронные машины 44
 Астрономическая единица длины 9
 Атмосфера 12
 Атмосферы типы 241
 Атомная единица массы 10, 18
 Аттестация изделий 225

Б

База 483
 Баки давления 452
 Баланс мощности 115
 Бально-индексная система 260
 Бар 12
 Барьерные ферриты 347
 Батарея 54
 Бегущая волна 159
 Безопасность электрооборудования 236, 265
 Беккерель 15
 Бериллий 376
 Биметаллические провода 390
 Биполярные транзисторы 483, 487
 Битумы 304, 306, 307
 Благородные металлы 378
 Блоки кабельные 444
 Болومتر 51
 Болцмана постоянная 19
 Большие интегральные микросхемы 510
 Бронзовые провода 392
 Бронзы 359, 381
 Броня кабелей 424
 Буквенные обозначения величин 22, 248
 Бумаги электроизоляционные 297
 Бумажная изоляция 472
 Бумажно-бакелитовые изделия 309
 Бумажно-масляная изоляция 406, 423
 Бэр. 15

В

Вазелин конденсаторный 292
 Валентная зона 70, 116
 Вар 17
 Варианты разработки 250
 Вариаций теорема 126
 Варакап 52
 Вариконд 50

Вакуометры 46, 216
 Варистор 48
 Варметр 51, 200
 Ватт 8, 10, 15
 Ваттметр 51, 198, 201
 Вводы 418, 454
 Вебер 17
 Веберметры 214
 Вектор на комплексной плоскости 108
 Вектрорметр 220
 Векторный анализ 164
 Величина 175
 Вентильные фотоэлементы 494
 Вес тела 9
 Ветви графа 115, 127
 Взаимная замена источников тока и ЭДС 124
 — индуктивность 114, 172
 — индукция 169
 Взаимности теорема 126
 Взрывоопасные производства 282
 Вибрационные нагрузки 243
 Виды на чертежах 27
 Вина постоянная 19
 Винипласт 294
 Винифлекс 469
 Вихревые токи 86
 Включение ветви 149
 Вместимости единицы 8, 9, 10
 Внешняя и внутренняя изоляция 398
 Внутреннее перенапряжение 399
 Возбуждения потенциал 94
 Возбужденное состояние системы 101
 Возгораемости материалов классификация 283
 Воздействие тока на организм 264
 Волнового числа единица 9
 Волновое сопротивление 18, 157
 Волокнистая изоляция 472
 Вольт 16
 Вольт-ампер 17
 Вольтамперметр 51
 Вольтметр 51, 182, 191
 Вольфрамовые контакты 379
 Восприимчивость диэлектрическая 23, 165
 — магнитная 22, 168, 326
 Времени единицы 7, 8, 9
 Времени жизни носителей заряда 318
 Вторичная электронная эмиссия 92
 Выключатели 59
 — Требования безопасности 266
 Выпрямитель 54
 Выпрямляющий контакт 73
 Высокополимерные диэлектрики 82
 Высокочастотные обмоточные провода 473
 Высокочастотный фильтр 154
 Вязкости единицы 9
 Вязкость магнитная 85, 86

Г

Газовая постоянная 19
 Газовые лазеры 102
 Газоразрядные лампы 54
 Гальваномагнитные тесламетры 215
 — явления 75, 210
 Гальванометр 51
 Гармоник коэффициент 134
 Гармоники 132, 134
 Гаусс 17, 18
 Гаусса теорема 163, 165
 — эффект 76, 211
 Гектар 10
 Генератор 63, 495, 497, 500
 — квантовый 102
 Генри 17
 Германий 319
 Герц 9
 Гетинакс 300, 302, 303
 Гильберт 17, 18
 Гирлянды из изоляторов 420
 Гистерезисметры 217
 Гистерезиса петля 85, 325
 Гистерезисный двигатель 45
 Глухозаземленная нейтраль 269, 270
 Годовой экономический эффект 250
 Годограф 126
 Гониометр 46
 Гравитационная постоянная 18
 Градиент 164
 Градус 9
 — Цельсия 7, 14
 Грамм 8
 Графы 115, 127, 150

Грей 15
Грозовые перенапряжения 398

Д

Давления единицы 9, 12
Двухполосник 109, 113
Действительная часть 22, 108
Действующее значение 107, 133
Декада 9
Декремент колебаний 22
Делители напряжения 183
Дельта-асбестовая изоляция 475
Дельта-древесина 301, 302, 303
Дерево графа 115
Деталь 24
Детекторы 495
Децибел 12
Дешифратор 63, 67, 496, 506
Джозефсона эффект 212
Джоуль 8, 9, 10, 15
Джоули — Ленца закон 115, 166
Диак 52
Дивергенция 164
Дизъюнктор 65
Дина 8
Динистор 52, 491
Диоды полупроводниковые 52, 481
Диполь 165
Дипольная поляризация 79
Диполя электрического момент 16
Дирака функция 148
Диффузии коэффициенты 95
Диффузионная длина 318
Диэлектрики 79
Диэлектрическая проницаемость 16, 163, 165
Диэлектрические материалы 287
Длинные линии 157
Длины единицы 7, 8, 10, 11
Добавочные резисторы 183
Добротность 22
Доверительные интервалы 202
Дольные единицы 18
Домены 85
Доноры 72, 318, 321
Допустимые температуры кабелей 437
— токи нагрузки 389, 440
Дроссель 46
Дуговой разряд 97
Дырочная электропроводность 72
Дырочный полупроводник 316
Дюамеля интеграл 147
Дюйм 10

Е

Единицы величин 7, 176
Емкости частичные 167
Емкостные коэффициенты 166
Емкостный элемент 109
Емкость электрическая 16, 22, 109, 167, 170
— — кабелей 431
ЕСКД 24

Ж

Жаростойкие сплавы высокого сопротивления 371
Жгуты кабелей и проводов 34
Жесткости степени 243
Жидкие электроизоляционные материалы 292
Жидкостные лазеры 103

З

Заграждающий фильтр 155
Загрязненности атмосферы классификация 399, 401
Заделки кабельные 445, 450, 452
Задержка 63
Задержки элементы 67
— схемы 496
Заземление 264, 268
Заземлители 271, 272, 276
Заземляющие и нулевые проводники 271
— устройства 269
Заливочные компаунды 305
Замыкание на землю 264
Зануление 268, 270
Запоминающие устройства 332, 496, 508

Запрещенная зона 70
Заряд элементарный 18
Заряды электрические 22, 279
Затвор 485
Затраты на разработку 252
— по эксплуатации 256
— приведенные 280
— текущие 251
Защита от электростатических зарядов 279
— — соприсоединения и попадания влаги 236
Защитное отключение 277
Защитные меры в электроустановках 268
— средства 279
Защиты от поражения током классы 236
Звезда 125, 130
Звуковое давление 13
Зеемана эффект 212
Знак качества 226
Значение величины 176
Зона растекания тока на землю 264
Зонная плавка 316
— теория 70, 316, 318

И

Идеальные источники тока и ЭДС 114
Изделия с применением электромотажа 33
Издержки 250
Излучение электромагнитное 101
Излучения постоянные 19
Измерение 175
Измерительные механизмы 182
Изображения 145
Изображения на чертежах 27
Изоляторы 397, 404, 407, 411
Изоляция конденсаторного типа 406
Изотермы 344
Импульсов обозначения 56
Инвертор 65
Индикации приборы 55
Индуктивность 17, 22, 108, 171
— взаимная 17, 22, 169
— кабелей 431
Индуктивный элемент 108
Индукции магнитной измерение 212
Индукционные ионизаторы 281
— методы измерения 210, 212, 213
Индукция магнитная 17, 22, 136, 167
— насыщения 325
— электрическая 16
— электромагнитная 169
Индуктивный элемент 108
Индукционное излучение 101
Интегральные микросхемы 495
Интегральных уравнений метод 408
Интегрирование 497, 499
Ионизаторы воздуха 281
Ионизации потенциал 94
Ионизирующих излучений единицы 15
Ионная поляризация 79
Искажений коэффициент 134
Искровой разряд 98
Исполнения климатические 239, 242
Испытания магнитных материалов 212
Испытательные напряжения 399
— — кабелей 436
Исток 485
— графа 128
Источники питания 495
— тока 114, 115, 124
— ЭДС 114, 115, 124
Источников света обозначения 54

К

Кабели на напряжения выше 110 кВ см. Масло-
наполненные кабели
— силовые 422
— — Требования безопасности 268
Кабель коаксиальный 174
Кабельная бумага 298
Кабельные изделия 422
Калория 10, 12, 19
Кальмаллой 346
Кандела 7, 15
Канифоль 306
Капитальные вложения 250, 251
Капрон 294
Карбонильное железо 341
Карно карты 502

- Картоны электроизоляционные 299
 Каскадное соединение 155
 Касторовое масло 292
 Категории качества 226, 258
 Катушек обозначения 62
 Катушки индуктивности 46, 172
 — с магнитопроводом 135
 Квантовая электроника 101
 Квантовое усиление 102
 Кельвин 7, 14
 Керра эффект 77, 212
 Кикоина — Носкова эффект 78
 Киловатт 10, 12
 Киловатт-час 10, 12
 Килограмм 7, 8
 Килограмм-сила 8, 10, 12
 Кирхгофа законы 116, 119, 136
 Классификация продукции 245
 — установок по мерам безопасности 264
 Классический метод расчета переходных процес-
 сов 136
 Классы защиты от поражения током 236
 — нагревостойкости 288
 — точности 180
 Клаузиуса — Мосоти уравнение 79
 Климатические воздействия 238
 Ключи 495
 Кнопочные выключатели 60
 Кодирование продукции 245
 Количества вещества единицы 7
 — движения единицы 9
 Количество электричества 16
 — измерение 196
 Коллектор 483
 Коллекторные материалы 381
 — профили 394
 Колодки из изоляторов 420
 Комбинированные измерительные приборы 193
 Коммутаторы 495
 Коммутационные устройства 58
 Компаратор 69, 497, 500
 Компаунды 304
 Компенсаторы измерительные 191
 Компенсации принцип 126
 Комплекс 24
 Комплексные числа 22, 108
 Комплект 24
 Конденсаторная бумага 297
 Конденсаторы 50, 170
 — Требования безопасности 267
 Константан 367
 Конструкции электроизоляционные 397
 Контактная разность потенциалов 74
 Контактные материалы 377
 — провода 392
 — явления в полупроводниках 73
 Контакты обозначения 58, 61
 Контрольные кабели 454
 Контур графа 115, 128
 Контурных токов метод расчета 120
 Концевые муфты и заделки 445, 451
 Концентрация носителей заряда 317
 Конъюнктор 65
 Координаты декартовы, цилиндрические и сфе-
 рические 164
 Кордиерит 315
 Коронный разряд 98
 Короткозамыкатель 60
 Коррозийная активность атмосферы 242
 Косвенное измерение 176
 Котона — Мутона эффект 77, 212
 Коэрцитивная сила 218, 325
 Коэрцитивметр 218
 Коэффициент затухания 22
 — мощности 22, 115, 134
 — приведения капитальных и текущих затрат 251
 — связи 22
 — трансформации 22
 — эффективности капитальных вложений 251
 Коэффициента теплопередачи единицы 14
 Коэффициенты бегущей и стоячей волн 159
 — ослабления, фазы и распространения 22, 157
 — унификации 225
 Кратные единицы 18
 Крезолоформальдегидные смолы 296
 Кремний 319
 Кремнийорганическая жидкость 292
 Кремнийорганические компаунды 306
 — смолы 297
 Крепированная бумага 299
 Кривая намагничивания 136
 — размагничивания 325
 Криопроводниковые материалы 375
 — провода 476
 Кристаллические диэлектрики 82
 Критические параметры сверхпроводника 97
 Критон 16
 Кулона закон 163
 Кюри 15
 — точка 327
- Л
- Лавинные дноды 482
 Лавсан 294
 Лазеры 102
 Лакоткани 308
 Лампы накаливания 54
 Лапласа преобразование 145
 — уравнение 166
 Латунь 355, 381
 Латунные муфты 447
 Ленты 391
 Ленца закон 169
 Лимитная цена 258
 Линейные изоляторы 416
 — токи и напряжения 129
 Линейных размеров ряды 235
 Линии воздушные 173
 — на чертежах 27
 — электрические 157
 Линий электрических обозначения 57
 Логарифмическая амплитудно-фазовая характери-
 стика 126
 Логические функции 502
 — элементы 62, 495, 501
 Лошадиная сила 10, 12
 Лощмидта число 19
 Люкс 15
 Люмен 15
 Люминесценция 78
 Люминофоры 78
- М
- Магнетон 19
 Магнитная постоянная 18, 22, 167
 — проницаемость 22, 86, 326
 Магнитное давление 104;
 — поле 167
 Магнитно-мягкие материалы 212, 327, 328
 Магнитно-мягких материалов испытания 212, 219
 Магнитно-твердые материалы 326, 328, 346
 Магнитные веса 212
 — измерения 210
 — материалы 325
 — моменты электрона, протона и мюона 19
 Магнитных величин единицы 17
 Магнитогидродинамики уравнения 103
 Магнитодвижущая сила 17, 22, 135
 Магнитодиодный эффект 76
 Магнитодиэлектрики 329, 340
 Магнитометры 216
 Магнитооптические явления 77
 Магнитопроводов обозначения 46
 — чертежи 36
 Магниторезистивный эффект 76, 210, 211
 Магнитосопротивление 76
 Магнитострикционные материалы 329, 346
 Магнитострикция 212, 328
 Магнитоэлектрическая система 182
 Мажоритарная логика 505
 Максвелл 17, 18
 Максвелла уравнения 169
 Малогабаритные монтажные кабели 465
 Малое напряжение 264
 Манганин 367
 Маслонаполненные кабели 427, 432, 443, 450, 478
 Масса эффективная носителя заряда 318
 Массы единицы 7, 8, 9, 10, 11
 — электрона, протона, мюона, атома водорода 18,
 19
 Масштабы чертежей 27
 Матрицы 119
 Маховой момент 10
 Мачтовые муфты 453
 Машин электрических заземление 268
 — номинальные параметры 233
 — обозначения 43
 — степени защиты 237
 Машин электрические. Выбор для пожароопас-
 ных помещений 284

Машины электрические. Требования безопасности 265
 МГД-генераторы 106
 Мгновенное значение 22, 107
 МДП-транзисторы 485
 Медная проволока 384
 Медные провода 387, 392
 Медь 351, 352, 376, 380
 — коллекторная 394
 Меламиноформальдегидная смола 297
 Мера 177
 Металлокерамические композиции 379
 Металлин 469
 Метод сеток 407
 Методы измерений 176
 Метр 7, 8, 9
 Механическая прочность изоляторов 409
 Механические воздействия 243
 Механических единиц величина 8
 Микалекс 312
 Микалента 312
 Миканит 310
 Микафолы 311
 Микашелк 312
 Микровольтметры и микроамперметры 197, 198
 Микрон 11
 Микропровода 475
 Микропроцессоры 510
 Микросхемы 495
 Милл 10
 Миллиметр водяного столба 12
 — ртутного столба 12
 Минеральная изоляция 470
 Минимизация логических выражений 503
 Минута 9
 Мнимая часть 22, 108
 Моделирование полей 167
 Модуляторы 495
 Молионы 81
 Моль 7
 Момент диполя 165
 — импульса 9
 — инерции 9, 10
 — количества движения (импульса) 9
 — магнитный 17, 22, 85
 — силы 9
 — электрический 22
 Монтажные кабели и провода 464
 Мосты измерительные 184, 190
 Мощности измерение 187, 196
 Мощность 8, 9, 10, 12
 — активная 114, 134, 187
 — полная 16, 114, 134, 187
 — реактивная 16, 22, 114, 134, 187
 Муфты кабельные 445

Н

Наведение ЭДС 169
 Нагреватели электрические 54
 Нагревостойкие провода 462
 Нагревостойкость материалов 288
 Нагрузка согласованная 152
 Наложения метод 124
 Намагниченность 17, 22, 168, 325
 Намагничивание 85
 Намотанные электроизоляционные изделия 309
 Напряжение 16, 22, 108
 — относительно земли 264
 Напряжения измерение 182, 195
 — механического единицы 9
 — номинальные 231, 265
 — прикосновения и шага 264, 270, 275
 Напряженность магнитного поля 17, 22, 136, 168, 325
 — электрического поля 16, 22, 163
 Насосы электромагнитные 104
 Неизолированные провода 387
 Нейзильбер 367
 Нейтрализаторы 281
 Нейтрализация зарядов 281
 Нейтральный провод 129
 «Некорректные» задачи 136
 Нелегированные электротехнические стали 336
 Непер 12
 Несамостоятельный разряд 96
 Несимметричные четырехполюсники 149
 Несинусоидальности коэффициенты 134
 Несинусоидальные токи 131
 Неупругие столкновения 93
 Неуравновешенные мосты 186
 Нечетные функции 133

Низкочастотный фильтр 154
 Нихромы 374
 Новолачные смолы 296
 Номинальные параметры 231
 Нормативный коэффициент эффективности 251
 Нулевая последовательность 130, 131
 Ньютон 8

О

Обедиеино-пропитанная изоляция 423
 Обмоток обозначения 43, 46, 56
 — чертежи 35
 Обмоточные провода 469
 Обозначение напряжений на схемах 126
 Оболочки кабелей 424
 Обработка прямых измерений 204
 Образцовые и рабочие средства измерений 177
 Обратная последовательность 130, 131
 Обращенный диод 52
 Объем единицы 8, 9, 10
 Огнестойкость конструкций и зданий 286
 Ограничители 497, 500
 Одновибратор 63, 68
 Однородная линия 157
 Октава 9
 Ом 16, 109
 Ома закон 117, 166
 Омметр 51
 Операторное сопротивление 143
 Операторный метод расчета переходных процессов 145
 Операторных величин обозначения 22
 Операционные усилители 68, 497
 Опорные изоляторы 409, 411
 Оптимизация экономическая 251
 Оптопара 54, 495
 Оптоэлектронные приборы 494
 Опротны 495
 Органическое стекло 295
 Оригиналы 145
 Остаточная индукция 325, 326
 Осциллографический способ измерения 213
 Осциллографы 51
 Осцилоскоп 51
 Отделитель 60
 Отключение ветви 149
 Относительных величин обозначение 23
 Отношение чисел витков 22
 Отраженная волна 157

П

Падающая волна 157
 Память 507
 Параллельное соединение 117
 Параметр 176
 Параметрический метод испытания 214
 Парсек 10
 Паскаль 9
 Пассивные двухполюсники 109
 — четырехполюсники 149
 Пашена кривые 97
 Передаточная функция 22, 126, 147, 148
 Передача графа 128
 Переключатели 60
 Перемагничивание 85
 Переменимых состояния метод 143
 Перенапряжения 398, 400
 Переносные электроприемники 277
 Переход электронно-дырочный 482
 Переходная функция 148
 Переходные процессы 136, 159
 Период 9, 22, 107
 Периодическая система элементов-20
 Пермадлой 329, 338
 Пермадлой молибденовый 341
 Пермеидюр 329, 346
 Перминвар 329, 344
 Печатных плат чертежи 36
 Пиннинг 89
 Пирса элемент 65
 Плазма газовая 9
 Плазменный асинхронный двигатель 105
 Планка постоянная 19
 Пластмассовая изоляция кабелей 423
 Пластиковая группа контактных материалов 377
 Пленочная изоляция 473
 Плотность 8
 — заряда 23

Плотность тока 22, 166
 Площади единицы 8, 10, 11
 Поверхностный эффект 97
 Повторитель 65
 Повторные заземления 271
 Погрешности измерения 176, 178, 202
 Подвижности носителей заряда 317
 — электронов 16
 Подobia метод 125
 Подпывающие пункты 453
 Подстанции. Требования к безопасности 266
 Пожароопасных помещений и установок электро-
 оборудование 282
 Поинтинга вектор 23, 170
 Поле магнитное 167
 — электрическое 163
 — электромагнитное 169
 Полые транзисторы 485, 490
 Полиамидимидная изоляция 470
 Поливинилхлорид 295
 Поликапролактан 294
 Полимерные диэлектрики 293
 Полиметилметакрилат 294
 Полистирол 293
 Полуретан 294
 Полиуретановые лаки 469
 Полиформальдегид 295
 Полиэтилен 293
 Полиэтиленовая изоляция кабелей 423
 Полиэтилентерефталатные лаки 469
 Полиэфиримидные лаки 470
 Полиэфирные лаки 469
 Полиэфирнануратимидные лаки 470
 Полиэфиры 304
 Полная мощность 16, 114, 134, 187
 Полного тока закон 168, 169
 Полосовой фильтр 154
 Полупроводниковые материалы 316
 — приборы 481
 Полупроводниковых приборов обозначения 51
 Полупроводящая бумага 298
 Полые провода 390
 Поляризация диэлектриков 79
 Поляризованность 16, 22, 79, 165
 Поляризуемость 79
 Полярные диэлектрики 79
 — материалы 288
 Помещений классификация по опасности пораже-
 ния током 265
 Помещения пожароопасные 282
 — электромагнитные 265
 Поощрительные надбавки к ценам 257
 Пороговые токи 264
 Пороговый элемент 63
 Постоянная магнитная 18, 22, 167
 — составляющая 132
 — электрическая 18, 22, 163
 Постоянного тока машины 45
 Постоянные магниты 212, 328, 330, 332, 347
 — ослабления, фазы, передачи 22, 151
 Постоянных магнитов контроль 212, 218
 Потенциал векторный магнитный 17
 — электрический 16, 23, 163
 Потенциалов магнитных скалярных разность 17
 Потенциал-регулятор 45
 Потенциальные коэффициенты 166
 Потенциалы возбуждения и ионизации 94
 — магнитные 168
 — электромагнитного поля 170
 Потенциометрический метод измерения 213
 Потенциометры 220
 — функциональные 48
 Потери диэлектрические 80
 — удельные 326
 Поток магнитный 17, 23, 136, 167
 — энергии 43
 Потока теплового единицы 14
 Потокосцепление 23
 Предохранители 47
 Предпочтительные числа 228
 Представление результатов измерения 207
 Прейскуранты на электротехнические изделия 253
 Преобразование треугольника в звезду 125
 Преобразователи 495, 497, 501
 — измерительные 182
 — Требования к безопасности 268
 Приборы измерительные 51, 177
 Прибыль 258
 — нормативная 251
 Привод 43
 Прикосновения напряжения 264, 270, 275
 Примеси донорные и акцепторные 318

Пробивные напряжения 401
 — предохранители 268
 Пробой воздуха и газов 98
 — диэлектриков 82
 — изоляции 399
 Провода монтажные 465
 — установочные 458
 Проводности зона 70, 316
 — комплексная, полная, активная и реактивная 22, 169
 Проводимость в диэлектрике 82
 — магнитная 17
 — полупроводников 316
 — удельная 166
 — электрическая 16
 Проводники заземляющие и нулевые 276
 Проводниковые материалы 351
 Прокладка силовых кабелей 432
 Проницаемость диэлектрическая 16, 22, 79
 — магнитная 17, 22, 168
 Пропиточные компаунды 304
 Проходные изоляторы 410, 413
 Прямая последовательность 130, 131
 Прямоугольная петля гистерезиса 332, 341
 Прямоугольные обмоточные провода 472
 Прямые измерения 176
 Пуассона уравнения 166
 Путь графа 128
 — утечки по изоляции 399

Р

Работа выхода 90
 Работы единицы 9, 12
 Радлан 8
 Радиоактивности единицы 15
 Радиусы изгиба силовых кабелей 435
 Разложения теорема 146
 Размагничивающая часть петли гистерезиса 325
 Размагничивающий фактор 326
 Размер величины 176
 Размеры на чертежах 28
 Разницы уровней для силовых кабелей 436
 Разность потенциалов 165
 Разработка проектной документации 30
 Разрезы на чертежах 27
 Разрешенная зона 70
 Разрядники 47
 — Требования безопасности 266
 Разрядные напряжения 402
 — — вдоль поверхности 403
 — — в масле 404
 — промежутки вдоль поверхности 405
 Разряды в газах 96
 Разъединители 60
 — Требования безопасности 266
 Распределители 508
 Распределительные устройства. Выбор исполнения
 для пожароопасных помещений 285
 — — Требования безопасности 266
 Реактивная мощность 16, 22, 114, 134, 187
 Реактивные составляющие напряжения и тока 109
 Реактор 46
 Регистр 63, 496, 508
 Регулирование 43
 — электрического поля 406
 Резиновая изоляция кабелей 423, 426
 Резистивный элемент 108
 Резисторы 48
 Резольные смолы 297
 Резонансы напряжения и тока 118
 Результат измерения 176
 Рескомбинация электронная 94, 318
 Релаксационная поляризация 79
 Реле 61
 Рентген 15
 Ричардсона — Дешмана формула 90
 Ротор вектора 164
 Ряды предпочтительных чисел 228
 — тригонометрические 131

С

Самондукция 169
 Самостоятельный разряд 96
 Сантиметр 8
 Сборочная единица 24
 Сверхпроводимость 87
 Сверхпроводниковые материалы 375
 Сверхпроводящие провода 476

- Световых величин единицы 15
 Светозлучающий диод 54
 Свинцовые кабельные муфты 447
 Связи графа 115
 Сдвиг фаз 23, 109, 115, 134
 Себестоимость изделия 252
 Сегнетоэлектрики 81
 Секунда 7, 8
 Селекции схемы 496
 Сельсин 45
 Серебряные контакты 378
 Сечения на чертежах 27
 СИ (система интернациональная) 7
 Сигнал электрический 43
 Сигнальные графы 127
 Сила 12
 — света 7
 Силкон 297
 Силовые кабели 422
 Силы электродинамические 168
 — электростатические 167
 Сименс 16
 Симметричная трехфазная система 130
 Симметричные составляющие 131
 — тиристоры 52, 493
 — четырехполюсники 152
 Синхронные машины 45
 Синхроскоп 51
 Система заряженных тел 166
 Систематические погрешности 205
 Сквозной ток 81
 Скользящие разряды 403
 Скорость 9, 12
 — волны фазовая 158
 — света 18, 22
 — угловая 9
 Слоистые электроизоляционные пластики 300
 Случайные погрешности 202
 Слюдянистая лента 313
 Слюдянистофоль 313
 Слюдянисты 313
 Слюдянопластофоль 314
 Слюдянопласты 314
 Смещение электрическое 16, 22, 165
 Совершенствование технологии 262
 Совол и совтол 292
 Соединительные муфты 445
 — шнуры 463
 Соленоид 172
 Сопоставимость вариантов 250
 Сопротивление активное 22, 108, 109
 — грунта 272
 — жилы кабеля 430
 — заземляющего устройства 269
 — магнитное 17
 — операторное 147
 — полиое 22, 109
 — проводника 170
 — растеканию 271
 — реактивное 22, 109
 — удельное 23
 — характеристическое 151, 157
 — электрическое 16, 22
 Сопротивления измерение 196, 317
 — линейные 126
 Составляющие симметричные 131
 Спектральная плотность 148
 Спецификация 25, 32
 Сплавы алюминиевые 365, 386, 387
 — высокого сопротивления 367, 471
 Спонтанная (самопроизвольная) поляризация 81
 Спонтанное излучение 101
 Сравнения схемы 496
 Среднее значение 22, 107, 103
 Средства измерений 177
 — — магнитных величин 214
 Срок окупаемости 262
 Стабилизаторы напряжения 497, 499
 Стабилитроны 52, 482
 Ставки рабочих 253
 Сталеалюминиевые провода 387
 Сталежелезные провода 390
 Стандартизация 222
 Стандартная медь 351
 Стандарты ЕСКД 25
 Стеатит 315
 Стекловолокнистая изоляция 474
 Стекломикрокалента 312
 Стекломиканиты 311
 Стеклослюдянистоэлектротекстолит 313
 Стеклослюдянисты 313
 Стеклослюдянопласты 314, 315
 Стеклотекстолит 301, 302, 303
 Стеклотекстолитовые изделия 309, 310
 Стеклые изоляторы 416
 Степени жесткости 244
 — защиты от соприкосновения с движущимися частями 236
 Стерadian 8
 Стержневые изоляторы 418
 Стефана — Больцмана постоянная 19
 Сток 485
 Стоки графа 127
 Столкновение электронов с атомами и молекулами 93
 Стопорные муфты 445, 451
 Стоячие волны 159
 Стриммер 98
 Стробоскопический способ измерения 213
 Ступенчатые цены 258
 Сумматор 63, 496
 Суммирование 496
 Схемы 25
 — замещения 108
 — — П- и Т-образные 151
 — электрические 37
 Счетчик 51, 63, 190, 496, 508
- Т
- Тарельчатые изоляторы 416
 Таунсенда условие 97
 Твердотельные лазеры 103
 Текстолит 300, 302, 303
 Текстолитовые изделия 309, 310
 Телесный угол 8
 Телефонная бумага 298
 Темный разряд 96
 Температурный индекс 288
 — коэффициент 14
 — — расширения газов 19
 — — сопротивления 352
 Температуропроводность 14
 Температуры единицы 7, 8, 14, 15
 Терморезистор 49
 Тепловой удар 469
 Тепловые сопротивления кабельных материалов и грунта 437
 Тепловых величин единицы 14
 Теплоемкость 14
 Теплопроводность 14
 Теплоты количество 14
 Терминов стандартизация 247
 Термодинамическая температурная шкала 8, 15
 Термозависимые магнитные материалы 329, 346
 Термолары 51
 Термопластичные пластмассы 293
 Термопреобразователь 51
 Терморезистивные пластмассы 296
 Терморезистор 48
 Термо-ЭДС удельная 352
 Термoeлектронная эмиссия 90
 Тесла 17
 Тесламетры 215
 Технико-экономические показатели 259
 Техническая единица массы 8
 Технические задание, предложение, проект 30
 — условия 223
 Тикональ 347
 Тиристоры 52, 491
 Тлеющий разряд 97
 Ток 16, 22, 56, 166
 Токи в вакууме 93
 Токов измерение 182, 195
 Токи номинальные 233
 — предельные 269
 Токосъёмники 47
 Тонна 9
 Тонны короткая и длинная 12
 Топографические векторные диаграммы 117
 Топологические методы расчета цепей 123
 — свойства цепей 115
 Торонд 173
 Точность измерений 178
 Транзисторы 53, 483
 Трансформатор вращающийся 45
 — идеальный 152
 — трехфазный поворотный 45
 Трансформаторное масло 292
 Трансформаторов заземление 268
 — мощности 234
 Трансформаторы 45
 — тока и напряжения 47, 183

Трансформаторы. Требования безопасности 266
 Треугольник 125, 130
 Треугольники напряжений токов, сопротивлений и проводимостей 113
 Трехфазные цепи 129, 134
 Триак 52, 493
 Триггер 63, 65, 496, 506
 — Шмитта 63, 68
 Тригонометрический ряд 131
 Тропическое исполнение 239, 244
 Туннельный диод 52

У

Угла единицы 8, 9
 Угловая частота 23, 107
 Угол потерь 22
 Ударные нагрузки 243
 Удельное сопротивление 351
 Узловых потенциалов метод 191
 Узлы графа 115, 127
 Ультрафарфор 315
 Умова — Пойнтинга теорема 170
 Унификация 222, 224
 Управления кабеля 455
 Упругие столкновения 83
 Уравновешенные мосты 184
 Усилитель 63, 68, 496, 497
 — магнитный 47
 — операционный 68, 497
 — электромагнитный 45
 Усилия тяжения для кабелей допустимые 436
 Ускорение нормальное (свободного падения) 18
 Ускорения единицы 9, 12
 — углового единицы 9
 Установки для магнитных измерений 219
 Установочные провода и шнуры 458

Ф

Фаза 107
 Фазные токи и напряжения 129
 Фазовая скорость 158
 Фазовращатель емкостный 50
 Фазометр 51, 201
 Фазорегулятор 45
 Фазо-частотная характеристика 126, 148
 Фарад 16
 Фарадея число 19
 — эффект 77, 212
 Фарфор 315
 Фарфоровые изделия 407
 Фенолоанилиноформальдегидные смолы 296
 Фенолоформальдегидные смолы 297
 Ферми уровень 70
 Ферромагнетики 329
 Ферриты 329, 339, 343, 344, 347
 Феррозондовые тесламетры 216
 Феррозонды 211
 Ферромагнетики 85
 Ферромагнитный резонанс 211
 — эффект Холла 75
 Феррометрический способ 213, 220
 Фехраль 374
 Фибра 299
 Фильтры 155, 496, 497, 499
 Флюоресценция 78
 Фононы 88
 Форматы чертежей 26
 Формирователь 63, 68
 Формы коэффициент 134, 136
 Фосфоресценция 78
 Фотодиод 53, 494
 Фотолюминесценция 78
 Фотомагнитоэлектрический эффект 78
 Фоторезистор 53, 494
 Фоторезистивный эффект 78
 Фототиристор 53
 Фототранзистор 53
 Фотозлектронная эмиссия 91
 Фотозлементы вентильные 494
 Фотоэффект 77
 Фторопласты 293
 Функции логические 63
 — распределения 208
 Функционально-стоимостный анализ 262
 Фурье интеграл 148
 — преобразование 148
 — ряд 131

Х

Характеристические уравнения 136
 Хевсайда формулы 147
 — функция 148
 Холла эффект 75, 210, 317
 Холодостойкое исполнение 244
 Хромоалюминиевые сплавы 374
 Хромоникелевые сплавы 374

Ц

Цен образование 252
 Центнер 11
 Центробежные нагрузки 243
 Цепи предельные 257
 Цепи постоянного и переменного тока 107
 — с распределенными параметрами 159
 Цепные схемы 155
 Циклотронный резонанс 77
 Цифровые измерения 191

Ч

Час 9
 Частота 9, 22, 107
 — вращения 9, 12
 — угловая 23, 107
 Частотомер 51, 201
 Частоты измерение 196
 — номинальные 232
 Чертежи 25, 31
 Четные функции 132
 Четрехполосники 149
 Число витков 22
 — пар полюсов 22
 — фаз 22
 Чохральского метод 316
 Чугунные кабельные муфты 447

Ш

Шага напряжение 264, 275
 Шеффера элемент 65
 Шины 391
 Шифратор 63, 496
 Шнуры соединительные 463
 Шрифты чертежные 27
 Штыревые изоляторы 416
 Шунты 183

Щ

Щетки для электрических машин 381
 Щитовые приборы 194

Э

Эйлера — Фурье ряд 131
 Эйштейна закон 91
 Эквивалентные синусоиды 134
 Эквипотенциаль 165
 Экономическая эффективность 249
 Экономическое стимулирование качества 228
 Электрическая постоянная 18, 163
 — прочность диэлектрика 83
 — изоляции 399
 — изоляционных промежутков 401
 Электрических величин единицы 16
 — полей расчеты 407
 Электрическое поле 163
 Электробезопасность 263
 Электродвижущая сила 16, 22
 Электродинамические силы 169
 Электроизоляционные конструкции 397
 — материалы 287
 Электрокерамические материалы 315
 Электромагнитной индукции закон 169
 Электрона заряд 18
 Электрон-вольт 10
 Электроинная поляризация 79
 — электропроводность 72
 Электропроводный переход 74
 Электронный парамагнитный резонанс 211
 — полупроводник 316
 Электронпечь 54

Электропроводность диэлектриков 81
— полупроводников 72
Электротепловое реле 62
Электротермические устройства и установки 54
Электротехнические стали 333
Электротравмы 264
Электрофарфор 315
Электрофрез 81
Элемент гальванический 54
Элементы цепи 108
Эмалево-волокнистая изоляция 472
Эмалированные провода 469
Эмиссия электронов 90
Эмиттер 483
Энергии единицы 9, 10, 12
— электрической измерение 190
Энергия 22
— перемагничивания 325

Энергия поля 167
— электромагнитная 168
Эпоксидная смола 305
Эпоксидные кабельные муфты 448
Эрг 8, 10, 12, 18
Эрстед 17, 18
Эскапон 293
Эффективность новой техники 249

Ю

ЮНДК сплавы 347

Я

Ядерный магнитный резонанс 211

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК. Т. I

Редактор *И. В. Антик*

Технический редактор *Н. П. Собакина*

Корректор *З. Б. Драновская*

ИБ № 2431

Сдано в набор 08.02.80 г. Подписано в печать 05.06.80 г. Т-12424.
Формат 70×108^{1/16} Бумага типографская № 2 Гарн. шрифта литератур-
ная Печать высокая Усл. печ. л. 45,5 Уч.-изд. л. 61,53 Тираж 80 000 экз.
(1-й завод 1—39 000 экз.) Заказ № 288 Цена 3 р. 60 к.

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7